

文章编号: 0258-0926(2015)03-0120-05; doi:10.13832/j.jnpe.2015.03.0120

停堆氧化期间加大净化流量改进可行性分析

王之肖

中广核工程有限公司, 广东深圳, 518057

摘要: 使用化学和容积控制 (RCV) 系统水力模型, 研究 M310 机组停堆氧化期间提高净化流量以缩短冷却剂净化时间的可行性, 并提出初步的工程改造方案。研究结果表明, 停堆氧化净化流量从 27.2 m³/h 提高到 40 m³/h, 1000 MW 级核电机组单次大修至少可节约 2 h 工期。

关键词: 核电厂; 水力模拟; 工程改造

中图分类号: TL334 **文献标志码:** A

Feasibility Analysis for Increasing Purification Flowrate during Plant Shutdown Oxygenation

Wang Zhixiao

China Nuclear Power Engineering Co, Ltd., Shenzhen, Guangdong, 518057, China

Abstract: Using RCV system hydraulic model, the feasibility of increasing purification flowrate during plant shutdown oxygenation of M310 units is analyzed, and a basic engineering modification for this item is provided. The result indicates that the purification flowrate increase from 27.2 m³/h to 40 m³/h, and it can save two hour at least in every maintenance period of the 1000 MW nuclear power unit.

Key words: Nuclear power plant, Hydraulic simulation, Engineering modification

0 引言

现 M310 机组停堆过程中, 一回路冷却剂系统 (RCP) 压力逐渐降低, 反应堆余热排出系统 (RRA) 投运后, 正常下泄流在下泄孔板处由于压差过小, 流量已经降到较小值。此时, 从 RRA 泵出口和 RRA 热交换器间引出低压下泄流, 在化学和容积控制系统 (RCV) 下泄孔板下游接入, 在 3 台主泵均运行情况下, 调节下泄净化流量可以达到 27 m³/h。

在一回路压力为 2.6×10⁶ Pa (文中的压力值均为绝对压力) 平台下 (RCP037、039、137、139MP 测量值), 当一回路冷却剂温度降低到 80 时, 注入双氧水对一回路进行氧化, 随之有大量的腐蚀产物出现, 需要对一回路进行大流量的连续净化以满足机组状态变化时的放射性化学条件。现

有 M310 机组的运行操作规程中, 一回路加入双氧水后 20 min, 加大净化流量到 27 m³/h, 净化过程持续 12~24 h。

由于停堆氧化净化占用部分大修关键路径, 因此, 如果能在停堆氧化期间将净化流量提高到 40 m³/h, 可缩短净化时间, 有利于减少大修周期。

本文使用 APROS 模拟软件, 建立 RCV 系统工艺模型, 模拟机组停堆氧化净化期间 RCV 回路水力特性, 从技术上分析加大氧化期间净化流量的可行性, 然后从改进的成本及收益上衡量改进的经济效益。

1 系统工艺流程

改进涉及的 RCV 系统管路及设备如图 1 所示。从图 1 中可见, 机组停堆氧化净化期间, 正

收稿日期: 2014-05-07; 修回日期: 2015-01-15

作者简介: 王之肖 (1975—), 男, 高级工程师, 现从事核电厂系统设计工作

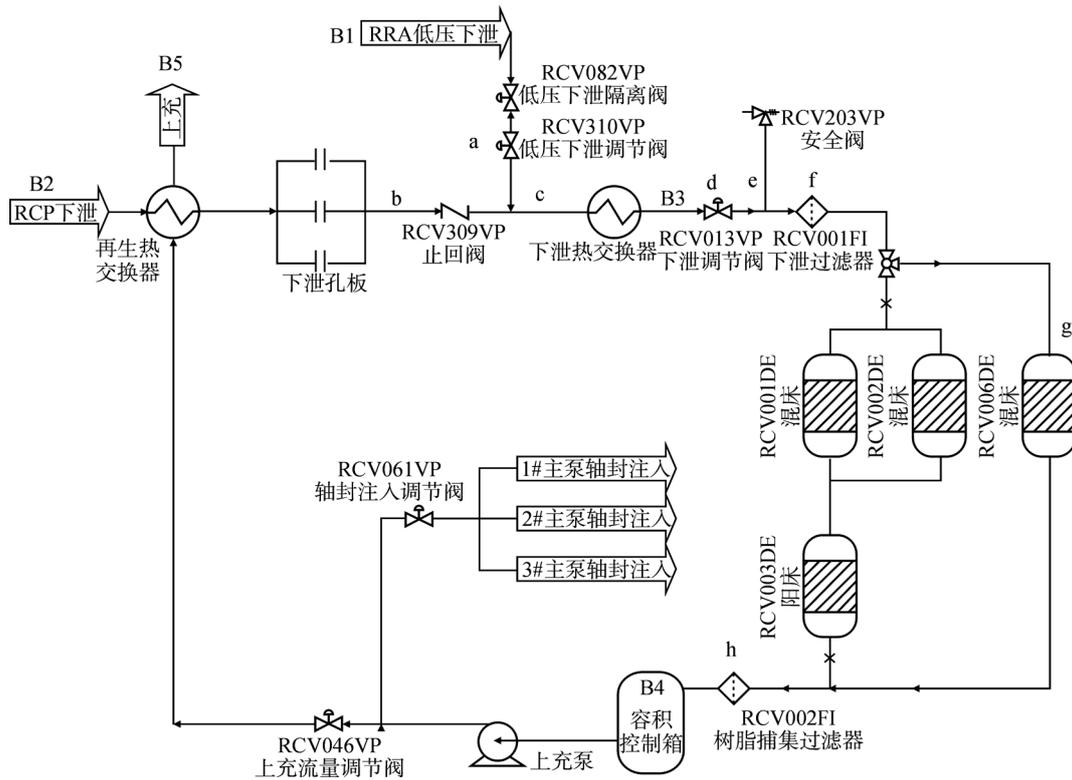


图1 改进流程示意图

Fig. 1 Flow Diagram of Modification

常下泄管线保持开启，3块孔板保持开状态，防止一回路瞬时超压。低压下泄由RRA泵出口（RRA热交换器前）引入到RCV。低压下泄隔离阀RCV082VP开启后，由低压下泄流量调节阀RCV310VP调节流量，与正常下泄流在下泄孔板后汇合，总净化流量为 $27.2 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

由于此时一回路水实体汇合后的下泄流通过下泄热交换器冷却，在RCV013VP处，由一回路压力信号（由RCP039、137、139MP经处理而成）控制RCV013VP开度，使一回路压力维持在 $2.6 \times 10^6 \text{ Pa}$ 。下泄流进入下泄过滤器RCV001FI，滤去下泄流中腐蚀性颗粒，然后旁路RCV混床直接进入硼回收系统（TEP）混床除盐器TEP006DE进行净化除盐。此后进入RCV树脂捕集器RCV002FI，最后进入容控箱。为保护净化单元不会瞬时超压，在RCV001FI前设置安全阀RCV203VP，开启压力整定值为 $1.48 \times 10^6 \text{ Pa}$ 。

RCV001FI和RCV002FI的最大允许压降为 $1.38 \times 10^5 \text{ Pa}$ ，TEP006DE的最大允许压降为 $1.5 \times 10^5 \text{ Pa}$ ，超过此压差值就需要更换滤芯或树脂。TEP006DE的设计压力为 $1.6 \times 10^6 \text{ Pa}$ 。

从容积控制箱出来的净化流通过上充泵增压，一路使用上充流量调节阀RCV046VP调节流量，通过上充管线返回一回路，另一路通过主泵轴封注水流量调节阀RCV061VP，向3台主泵提供轴封水。

2 加大净化流量前系统工艺参数

本文利用水力学模型，对图1中的系统管路进行模拟计算，模型中边界条件根据机组实际运行参数设定，如表1所示。

如图1系统流程所示，以上充泵为界，分为2个部分。如果将净化流量从现有设计 $27.2 \text{ m}^3/\text{h}$

表1 水力模型模拟停堆氧化系统运行的边界条件

Table 1 Boundary Condition for Hydraulic Simulation Model of Plant Shutdown Oxygenation

序号	边界点	压力/ 10^5 Pa
B1	低压下泄入口	33
B2	正常下泄入口	32.4
B3	控制RCV013VP开度的一回路压力信号	26
B4	净化期间容控箱气空间压力	4
B5	上充出口背压	32.4

注：容控箱此时需要同时进行压缩空气SAR吹扫，压缩空气压力 $3.5 \times 10^5 \text{ Pa}$ ，并考虑喷头压差 $0.5 \times 10^5 \text{ Pa}$ ，故容控箱入口点边界的压力按 $4 \times 10^5 \text{ Pa}$ 计

提升到 40 m³/h,受影响较大的是泵前部分,这部分阻力元件较多,动力扬程裕量较小,是本文分析的重点。而泵后部分,由于上充泵扬程足够高,调节阀调节范围大,加大净化流量对其影响可以忽略。

选取 2 个有代表性的工况进行模拟计算,计算结果如表 2 所示。工况 1 是按最保守假设(净化单元均按达到脏堵压差限值)进行模拟,模拟结果数据包络了系统正常运行时可能出现的参数。又根据除盐床后过滤器 RCV002FI 不易脏堵的实际运行情况,选取工况 2 进行模拟,模拟结果佐证了工况 1 的包络性。

表 2 净化流量 27.2 m³/h 时运行参数模拟数据

Table 2 Simulating Data in Flowrate of 27.2 m³/h

图 1 中位置	工况	假设 工况 1	假设 工况 2
a	低压下泄流量/m ³ ·h ⁻¹	24.7	24.7
	RCV 310VP 开度/%	55	55
b	正常下泄流量/m ³ ·h ⁻¹	2.5	2.5
c	下泄总流量/m ³ ·h ⁻¹	27.2	27.2
d	RCV013VP 开度/%	51.1	50.5
e	RCV 203VP 安全阀前压力/10 ⁵ Pa	9.77	8.7
f	RCV 001FI 压差/10 ⁵ Pa	1.4	1.4
g	TEP006DE 前压力/10 ⁵ Pa	8.22	7.17
	TEP006DE 压差/10 ⁵ Pa	1.51	1.51
h	RCV 002FI 压差/10 ⁵ Pa	1.4	0.33

注: RCV001FI/RCV002FI/TEP006DE 按脏堵压差限值模拟计算,达到即更换; RCV001FI/TEP006DE 按脏堵压差限值模拟计算,达到即更换。RCV002FI 按干净时压差值计算

3 加大净化流量后系统数值模拟

与表 2 相对应,开大低压下泄流量调节阀 RCV310VP,加大净化流量到 40 m³/h,此时 RCV013VP 阀门开度依然由一回路压力信号(由 RCP039、137、139MP 经处理而成)控制,维持一回路压力在 2.6×10⁶ Pa。加大净化流量模拟分析中,系统边界条件不变(表 1),系统各部分参数模拟结果如表 3 所示。

从表 3 可知,将 RCV310VP 开度调整到 80% 情况下,下泄流量可以达到 40 m³/h 要求。

从假设工况 1 数值模拟结果看,RCV001FI 前压力为 10.5×10⁵ Pa,没有超出所在管线上安全阀 RCV203VP 的设定压力值 14.8×10⁵ Pa。TEP006DE 前压力 8.82×10⁵ Pa,也没有超出 TEP006DE 的设计压力 16×10⁵ Pa (abs)。符合

表 3 净化流量达 40 m³/h 后运行参数模拟

Table 3 Simulating Data in Flowrate of 40 m³/h

图 1 中位置点	工况	假设 工况 1	假设 工况 2
a	低压下泄流量/m ³ ·h ⁻¹	38.5	38.5
	RCV310VP 开度/%	80	80
b	正常下泄流量/m ³ ·h ⁻¹	1.54	1.54
c	下泄总流量/m ³ ·h ⁻¹	40.04	40.04
d	RCV013VP 开度/%	61.7	60.9
e	RCV203VP 安全阀前压力/10 ⁵ Pa	10.5	9.5
f	RCV001FI 压差/10 ⁵ Pa	1.4	1.41
g	TEP006DE 前压力/10 ⁵ Pa	8.82	7.77
	TEP006DE 压差/10 ⁵ Pa	1.54	1.54
h	RCV002FI 压差/10 ⁵ Pa	1.4	0.34

设计要求。

实际运行中,停堆氧化净化期间,TEP006DE 和 RCV002FI 一般不会达到压差限值,故 RCV001FI 过滤器前压力应该更低,距离 RCV203VP 开启的设定值余量更大。工况 2 模拟结果也说明了此问题。

4 现有设备适用性分析

净化流量增加后,管线内流体流速也随之增大。从第 3 节模拟结果来看,利用现有系统设备可以达到 40 m³/h 的净化流量,但需要分析调节阀是否在合理调节范围内、管道流体流速是否超标、除盐床、过滤器是否还满足相关设计规范等。

(1) 阀门: 阀门的分析主要关注调节阀的调节特性。从表 3 数据可以看出,将 RCV310VP 开大到 80% 开度后,净化流量达到 40 m³/h, RCV013VP 还可以将一回路压力控制在 2.6×10⁶ Pa, RCV013VP 的阀门开度也在理想调节范围内, RCV013VP 满足加大净化流量后设计要求。但是,此后将 RCV310VP 全开,流量几乎不再增大,因此,RCV310VP 在 40 m³/h 的净化流量下已经不在其理想调节范围内。

(2) 管道: 一般管道内流速在 2~5 m/s 内比较理想^[1]。在现有的 M310 设计下,如果流量增大到 40 m³/h,在系统流程中,流量最大、管道内径最小的是 RCV0115 管道,其外径为 60.3 mm,壁厚为 3.91 mm,管道内流速将会达到 5.14 m/s,略超出理想流速范围。

(3) 除盐床: 净化流量增加到 40 m³/h 后, TEP006DE 筒体内流速为 51 m/h,符合操作流速

小于 60 m³/h 的技术要求^[2]。此外，虽然净化流量加大，但冷却剂净化总量却没有改变，故对树脂的装填量没有影响。综合上述 2 方面内容可以看出，不需要改变原有设备设计。目前 M310 机组 TEP006DE 的设计压力是 1.6×10^6 Pa，实际上，根据表 3 数值模拟结果，在包络工况以下，TEP006DE 床前压力约为 8.82×10^5 Pa，况且其上游有安全阀 RCV203VP（RCV001FI 上游），此安全阀的设定开启压力为 1.48×10^6 Pa，可确保 TEP006DE 不会超过设计压力，故不需要在 TEP006DE 前设置安全阀。

(4) 测量装置：因为停堆氧化净化流量增大，此工况下的下泄流量和上充流量也将增大（分别为 40 m³/h 和 36.7 m³/h）。原下泄流量测量计 RCV005MD 量程（30 m³/h）和上充流量测量计 RCV018MD 量程（35 m³/h）已经不能满足加大停堆氧化净化流量的要求，需要对测量装置进行修改。

(5) 热交换器：下泄热交换器的设计热负荷为 4.81 MW，氧化净化期间，来流温度不高于 80℃，所需带走热负荷低于 2 MW，所以下泄热交换器换热能力满足增大净化流量后要求。此工况下，再生热交换器热侧流量很小，满足加大净化流量至 40 m³/h 后换热要求。两热交换器内水力方面经分析也满足相关设计要求，不会产生振动超标问题。

(6) 过滤器：根据经验，要加大净化流量，需按新的流量和压力条件，选用打褶深度较大的新型号 RCV001FI 和 RCV 002 FI 滤芯。

(7) 上充泵：净化流量增加前、后，上充泵在此工况下流量分别为 42.9 m³/h 和 56 m³/h。根据目前设计，上充泵能长期工作的流量范围为 13.6~160 m³/h，相对应的扬程大致为 1.77~ 0.49×10^7 Pa。净化流量增加到 40 m³/h 后，上充泵仍然能够运行在理想运行范围内。所以增加净化流量对上充泵性能和寿命没有造成影响。

停堆氧化净化期间，RCV 系统低压下泄入口压力为 3.3×10^6 Pa，根据表 3 模拟结果，此压力可以保证 RCV 以 40 m³/h 流量进行净化，故不需要在低压下泄管线前段另外增加增压泵。

5 改进方案

根据设备适用性分析结果，现有设备在提高

净化流量后，需要对如下设备进行重新设计选型：

(1) RCV310VP 更换为流量系数较大的阀门，使其在 40 m³/h 净化流量下仍然处于调节阀理想调节开度范围内。

(2) 将 RCV0115 管道规格修改为 $\phi 88.9$ mm \times 5.49 mm，以符合管道流速设计要求。此管道上的隔离阀 RCV010VP 也需要从 DN50 修改为 DN80，以匹配管道。

(3) RCV001FI 和 RCV 002 FI 滤芯选用打褶深度较大的新型号滤芯。

(4) 低压下泄入口压头足可以保证净化流量提升到 40 m³/h，故不需要在低压下泄管线前段另外增加增压泵。

(5) 因净化流量增加，改进前的上充、下泄流量测量仪表的量程不满足改进后的流量测量要求。根据停堆氧化净化工况使用少、流量大的特点，可以在现有的流量计后串联宽量程流量计，这样既保证正常工况（流量较小）时流量测量准确，又满足停堆氧化净化时大流量测量要求。

6 改进成本及收益

6.1 改进费用

新增设备成本方面，根据目前分析成果来看，本改进项需在 RCV005MD 和 RCV018MD 后各串联一台宽量程流量计，RCV001FI、RCV002FI 过滤器需要重做设计选型，RCV310VP 也需要选取更大调节范围的阀门，RCV0115 管道需要采用 88.9 mm 规格，其余各部件均可以沿用原设计。

6.2 改进收益

机组停堆氧化净化处于大修关键路径，净化过程持续 12~24 h（视净化前一回路放射性水平而定），一直到一回路满足主泵停运的放射性化学条件。

无论净化流量为 27.2 m³/h 还是 40 m³/h，所需要处理的冷却剂总量应相同，故提高净化流量后，所节约的净化时间 T 大致为：

$$T = \left(1 - \frac{27.2}{40}\right) \times T_0 \quad (1)$$

式中， T_0 为净化流量 27.2 m³/h 下单次停堆净化所需要时间，为 12~24 h。

由式 (1) 计算得出， T 为 3.84~7.88 h。

在主关键路径进行净化的同时，在次关键路径上进行安注管线逆止阀和低压安注管线贯穿件

试验,次关键路径工期约 10 h,即理论上停堆氧化净化占用大修关键路径为 2~14 h。

大亚湾核电站、岭澳核电站一期机组历次有完整记录的大修中,氧化净化所占大修关键路径时间统计如表 4 所示。

表 4 大亚湾核电站、岭澳核电站一期往年大修氧化净化占用关键路径时间数据记录

Table 4 Record of Outage Critical Path Time Occupied by Oxide Purification in Previous Years in Daya Bay and Ling'ao Phase One NPPs

大修代号	L104	D111	D212	D213	D113	D214
时间/h	3.42	2.22	2.17	4.42	3.8	1.93
平均时间/h	3					

注:大修代号中,字母代表电站(L代表岭澳核电站,D代表大亚湾核电站),第 1 个数字代表机组号,后 2 位数字代表大修的轮次

若保守的按理论上一回路净化占用大修关键路径的时间裕度为 2 h 计,由于提高停堆氧化净化流量后,根据式(1)计算净化时间可缩短 3.84~7.88 h,因此可以不再占用关键路径时间。即提高氧化净化流量的收益为每次大修至少可缩短 2 h 工期,这意味着可以提前 2 h 发电。

一回路的净化几乎贯穿整个大修,目前只有一回路氧化后的净化(直到达到主泵停运条件)

处于大修关键路径,其余都处于非关键路径。而氧化净化之后有一关键路径“高压安注管线逆止阀及贯穿件试验”(历时 14 h),将来可能安排到其他非大修关键路径上完成,伴随其进行且处于次关键路径上的净化将成为另一处关键路径。提高净化流量改进收益将更为明显。

7 结论

本文建立了 RCV 系统水力模型,分析了停堆氧化净化期间加大净化流量的可行性,模拟结果表明,可以将净化流量提高到 40 m³/h。

针对加大停堆氧化净化流量改进,提出了改进初步方案,使部分设备进行重新设计后能适应改进后的系统水力特性及运行要求。

对改进成本及收益进行评估,分析认为若实施改进后单次大修至少可节省大修工期约 2 h,经济效益明显。

参考文献:

- [1] 王怀义. 石油化工管道安装设计便查手册[M]. 北京: 中国石化出版社, 2007.
- [2] 刘家钰. 压水堆核电厂核岛设计: 第三卷[M]. 北京: 原子能出版社, 2010.

(责任编辑:张祚豪)