

# CPR1000 型核电机组容控箱气体覆盖切换方式优化改进

## Optimization and Improvement of Gas Cover Switching Mode of CPR1000 Nuclear Power Unit Volume Control Tank

刘剑 马凤果 刘晓伟 唐业福

Jian Liu Fengguo Ma Xiaowei Liu Yefu Tang

福建宁德核电有限公司 中国·福建 福鼎 355200

Fujian Ningde Nuclear Power Co., Ltd., Fuding, Fujian, 355200, China

**摘要:** CPR1000 型核电机组在上下行阶段需对化学与容积控制系统容控箱气体覆盖进行切换, 实现一回路氧化净化和氢含量控制要求。研究采用“快速接头+金属软管”连接的方式, 在保持物理隔离防止氢氧混合氢爆风险的前提下, 有效解决了 CPR1000 型核电机组容控箱气体覆盖切换效率低的问题。

**Abstract:** The CPR1000 nuclear power unit needs to switch the gas cover of the chemical and volume control system volume control tank in the upstream and downstream stages to achieve the primary oxidation purification and hydrogen content control requirements. The method of “quick joint + metal hose” connection is studied to effectively solve the problem of low gas cover switching efficiency of CPR1000 nuclear power unit volume control tank on the premise of maintaining physical isolation to prevent the risk of hydrogen and oxygen mixture explosion.

**关键词:** CPR1000; 快速接头; 软管; 气体; 切换

**Keywords:** CPR1000; quick connector; hose; gas; toggle

**DOI:** 10.12346/etr.v5i9.8538

## 1 引言

化学与容积控制系统(简称RCV系统)容控箱(RCV002BA)的主要作用之一是作为除气塔, 使一回路放射性气体从这里释放出来, 定期排往废气处理系统<sup>[1]</sup>。为了实现《化学与放射化学技术规范》对机组停堆前和停堆后一回路氢含量控制, 需要适时切换容控箱上部的覆盖气体。

目前现场切换由维修人员操作无法满足电厂运行程序控制要求的 1h 内完成切换的要求<sup>[2]</sup>, 论文对 CPR1000 型核电机组 RCV 系统容控箱气体覆盖切换方式效率低问题进行研究, 并提出可有效落地的技改方案, 提高容控箱气体覆盖方式的切换效率。

## 2 问题概述

机组在上下行阶段均需通过临时专用设施 T 对容控箱气体覆盖进行切换, 整个临时专用设施执行过程如下:

①运行隔离; ②专业取票并进岛; ③实施临时专用设施

TSD RCV01 切换; ④工作负责人出岛办理中止; ⑤运行解除隔离; ⑥气体吹扫结束后再次实施隔离; ⑦专业再次实施临时专用设施 TSD RCV01 切换(需更换垫片); ⑧解除隔离。

电厂运行程序要求, 隔离操作和临时专用设施弯头切换操作必须在 1h 内完成。但因办理工作票等工作流程花费的时间较多, 实际上该工作无法在 1h 内完成。

## 3 优化改进方案

### 3.1 总体设计方案

将临时专用设施 TSD RCV01 (“L”型法兰短节)改造为“快速接头+金属软管”连接:

①将阀门 RCV292VY 上游法兰切割拆除, 并焊接安装接头及金属软管, 金属软管末端连接快速接头(插头); ②将氢气/氮气供应侧法兰切割拆除, 并焊接安装快速接头(插座); ③将压缩空气供应侧法兰切割拆除, 并焊接安装快速接头(插座)。

【作者简介】刘剑(1984-), 男, 中国江苏连云港人, 本科, 工程师, 从事核电厂运行安全管理研究。

由于快速接头插头与插座之间可由运行人员快速拔插切换操作,因此采用该方案可有效解决目前现场临时专用设施 TSD RCV01 切换效率低的问题。

### 3.2 管线力学分析

#### 3.2.1 SAR 管线力学分析

本改造在原设计基础上,取消了原 SAR(仅用压缩空气分配系统)管线末端法兰、盲板及紧固件,并对原管道进行截短,改造新增快速接头插座的重量小于切除部分设备重量。即改造后管系重量有所降低,但该部分 SAR 管路走向及支架均未发生变化,因此改造方案不降低原管线的力学性能。

#### 3.2.2 RCV 管线力学分析

考虑到改造后软管两端均为自由端,特进行如下力学分析。

根据《机械设备设计和建造规则》RCC-M H 篇的规定,对于介质为真空、蒸汽、燃气或压缩空气的 1 寸管道,其支承件推荐最大间距为 2.8m;参考《管道支吊架技术规范》GB/T 17116.1 第 5.14.6 节,两支架之间管道的展开长度不应超过水平直管基本跨距的 0.75 倍。计算得出本改造所在 RCV 管道支架最大允许跨距为 L=2.1m,结合现场支架的安装位置距离分析,改造后支架布置满足上述最大跨距要求。

### 3.3 改造后流量影响分析

改造后原 1 寸直通管修改为快速接头和金属软管,流通内径变小。容控箱 RCV002BA 空气吹扫流量正常值为 40Nm<sup>3</sup>/h,流量低报警值为 15Nm<sup>3</sup>/h。当空气吹扫流量低于 15Nm<sup>3</sup>/h,可能增加氢气浓度从而导致产生易燃混合物和随后的爆炸混合物的风险。

#### 3.3.1 改前压缩空气流量

根据运行程序,压缩空气吹扫前容控箱内的压力通过调整阀门 SAR475VA 进行设定,并通过压力表 RCV010MP 读取,压力定值设定为 2.5bar.g。在整个空气吹扫过程中,通过多次调整阀门 RCV292VY 开度来增大吹扫流量,最终吹扫流量为 40Nm<sup>3</sup>/h。

#### 3.3.2 改后计算输入

第一,假设条件:

①不考虑 SAR 压缩空气系统压力波动对吹扫流量的影响。②不考虑快速接头、阀门等设备厂家设计参数与实际运行参数偏差对计算结果的影响。

第二,计算输入信息分析:

①管线长度变化。

改造为“快速接头+金属软管”连接后管道长度减少,但金属软管较原管道长度有所增加,故在计算沿程阻力变化时取新增软管长度 1m。改造后金属软管布置有圆曲弯,但考虑到减少了一个 90° 弯头,故在计算时不考虑圆曲弯所产生的局部阻力。

②快速接头设计信息。

对于双阀组结构快速插头,根据厂家提供的产品手册可知:在进口压力为 6bar.g、压降 0.3bar、温度 10℃时的气动

流量为 240Nm<sup>3</sup>/h。

③ SAR475VA 阀门设计信息。

该阀门为自力式压力调节阀,阀门相关设计参数如表 1 所示。

表 1 阀门设计参数

工作介质	空气	出口压力	0.35MPa.a
介质密度	1.293kg/Nm <sup>3</sup>	流量	100Nm <sup>3</sup> /h
工作温度	54℃	计算 kV	0.64
进口压力	1MPa.a	相对开度	54%

#### 3.3.3 计算过程

①计算思路。

以 SAR 系统最低设计压力为入口边界条件,RCV002BA 容控箱压力 2.5bar.a 为出口边界条件,压缩空气温度取最高设计温度 54℃。

已知 SAR475VA 阀门在表 1 工况下流量为 100Nm<sup>3</sup>/h 时,阀门相对开度 54%。从保守角度和可用参数的角度出发,分别计算 100Nm<sup>3</sup>/h 流量下新增快速接头和金属软管改造前、后压损的变化量,此压损变化量即为 SAR475VA 出口压力相比改造前的增加值。

在维持 SAR475VA 阀门在 54% 相对开度不变的条件下,计算改造后流经 SAR475VA 压缩空气流量,与程序要求 40Nm<sup>3</sup>/h 进行对比,即可判定是否能够满足吹扫要求。

②软管压损计算。

在计算新增软管压损值时,参考等温可压缩流体的压损计算 Weymouth 公式<sup>[3]</sup>:

$$q'_h = 1.5598 \times 10^{-4} \times \frac{T_b}{P'_b} \left( \frac{P_1'^2 - P_2'^2}{L_m T_{avg} S_g} \right)^{0.5} d^{2.667}$$

式中:  $q'_h$ ——标准工况下的体积流量,单位 Nm<sup>3</sup>/h,参考阀门设计流量 100Nm<sup>3</sup>/h;

$T_b$ ——标准工况下的热力学温度,  $T_b=288K$ ;

$P'_b$ ——标准工况下的绝对压力,  $P'_b=101325Pa$ ;

$P_1'$ ——入口绝对压力,单位 Pa;

$P_2'$ ——出口绝对压力,单位 Pa,取 250000Pa;

$L_m$ ——管道长度,单位 km,取  $L_m=0.001km$ ;

$T_{avg}$ ——计算平均温度,取设计温度 327.14K;

$S_g$ ——计算气体相对空气的相对密度,  $S_g=1$ ;

$d$ ——软管内径,取  $d=16mm$ ;

故流经软管所产生的压损为 0.123bar。

③快速接头压损计算。

考虑到计算流经快速接头的实际压损较为困难,保守取在现场实际流量为 100Nm<sup>3</sup>/h、进口压力为 2.5bar.g,通过对快速接头的产品手册可知,流经快速接头的压损为 0.3bar 也是保守的。

④ SAR475VA 下游管线压损计算。

在计算 SAR475VA 阀门至 RCV002BA 容控箱压损时,

计算过程中将弯头和阀门等效为一定长度的直管段,计算方法同样采用 Weymouth 可压缩管道阻力经验公式。查询管道等轴图和相关阀门图纸汇总信息如表 2 所示,理论计算得到 SAR475VA 阀门至 RCV002BA 容控箱压损为 0.229bar。

表 2 管线信息统计表

部件名称	接口内径 mm	等效长度 m	备注
管道	27.86	14.222	L=14.222m
弯头	27.86	13.372	90° 弯头数量 16
RCV292VY	27.86	5.656	L/D=203
RCV215VY	27.86	3.483	L/D=125
总等效长度	36.733m		

### ⑤改造后流量计算。

在保证容控箱压力为 2.5bar.a 不变的条件下,改造后调节阀取压点处压力将有所增加,增加值包括新增软管和快速接头所产生的压损。对于改造后压缩空气流量计算,选取 SAR 系统最低设计供气压力、阀门开度不变的条件下系统流量。阀门流量与压损之间关系参考可压缩局部阻力件经验公式<sup>[2]</sup>:

$$q = YCA \sqrt{\frac{2 \Delta P}{\rho}}$$

式中:  $q$ ——气体实际流量;

$Y$ ——气体净膨胀系数,  $Y$  值与阀门进出口压力比有关,压力比 ( $P_2/P_1$ ) 越大,  $Y$  值越大;

$C$ ——流量系数, 主要与阻力件结构形式有关, 阀门开度不变条件下  $C$  值不变;

$A$ ——接口管道截面积, 阀门开度不变条件下  $A$  值不变;

$\rho$ ——上游工况下的气体密度。

将表 1 中 SAR475VA 阀门设计参数作为工况 1, 流经阀门气体流量与压差关系式为:

$$q_1 = Y_1 C_1 A_1 \sqrt{\frac{2 \Delta P_1}{\rho_1}}$$

将改造后 SAR475VA 所处运行工况作为工况 2, 流经阀门气体流量与压差关系式为:

$$q_2 = Y_2 C_2 A_2 \sqrt{\frac{2 \Delta P_2}{\rho_2}}$$

即:

$$\frac{q_1}{q_2} = \frac{Y_1 C_1 A_1 \sqrt{\frac{2 \Delta P_1}{\rho_1}}}{Y_2 C_2 A_2 \sqrt{\frac{2 \Delta P_2}{\rho_2}}}$$

因工况 1 和工况 2 阀门开度不变, 即  $C_1=C_2$ 、 $A_1=A_2$ 。得:

$$q_2 = q_1 \frac{Y_2}{Y_1} \sqrt{\frac{\Delta P_2 \rho_1}{\Delta P_1 \rho_2}}$$

对于  $Y$  值, 上下游压力比越大,  $Y$  值越大。根据表 3 可知: 改造后阀门上下游压力比变大, 故  $Y_2$  大于  $Y_1$ , 在计算  $q_2$  流量时, 保守考虑  $Y_2=Y_1$ 。

表 3 压缩空气流量计算表

计算参数	工况 1	工况 2
入口压力 $P_1$ (bar.a)	10	7.8
出口压力 $P_2$ (bar.a)	3.5	4.152
进出口压力比 ( $P_2/P_1$ )	0.35	0.532
$\Delta P$ 压差 (bar)	6.5	3.648
流量 $q$ ( $Nm^3/h$ )	100	74.92

同时工况 2 压缩空气密度小于设计工况 1 压缩空气密度, 同样保守考虑。

进一步化简可以得到:

$$q_2 = q_1 \sqrt{\frac{\Delta P_2}{\Delta P_1}}$$

计算得到改造后压缩空气吹扫工况下流经 SAR475VA 流量仍可达到  $74.92Nm^3/h$ , 仍可以满足系统要求值  $40Nm^3/h$ 。

## 4 结论

容控箱气体覆盖切换方式将 TSD RCV01 (“法兰短节”连接) 变更为“快速接头+金属软管”连接实施后, 优化容控箱气体覆盖切换现场操作方式, 解决了 CPR1000 型核电机组共性问题: ①机组上下行阶段容控箱气体切换不及时而影响大修路径(单次操作可节约大修路径不低于 2h)。②大幅度减少容控箱气体供给被切断时间, 避免压力变化造成 RCV 上充泵汽蚀的风险, 提高了重大核安全设备的可靠性。

本改造是中国 CPR1000 型核电机组首次自主设计实施, 为其他机组提供了行之有效的方案, 也为其他需要保持从物理隔离上防止介质混合的快速操作提供了一套可供借鉴的有效方案和解决问题的思路。

## 参考文献

- [1] 寇全喜. 压水堆核电站系统与设备[D]. 宁德: 福建宁德核电有限公司, 2015.
- [2] 魏挺. 高级运行[D]. 宁德: 福建宁德核电有限公司, 2015.
- [3] [美] CRANE 工程部. 流体流经阀门、管件和管道的流体计算[M]. 1 版. 北京: 化学工业出版社, 2013.