

文章编号: 0258-0926(2015)S1-0107-04; doi: 10.13832/j.jnpe.2015.S1.0107

核电机组压缩空气系统调试中的若干问题探讨

林 仲

中核核电运行管理有限公司方家山调试队, 浙江嘉兴, 314300

摘要: 压缩空气系统为整个核电厂提供所需要的压缩空气, 以满足所有厂房内动力设施运行和维护需求。结合方家山核电厂压缩空气系统调试过程中的实际经验, 分别从系统的供气能力、隔离控制及事故工况下的保压能力等方面, 论证该系统的整体设计的可靠性, 并提出了若干经现场实际验证的合理措施。

关键词: 压缩空气; 调试; 失气; 密封

中图分类号: TL353⁺.1 **文献标志码:** A

Discussion For Some Questions in Debugging of Compressed Air System of Nuclear Power Plant

Lin Zhong

Fangjiashan Debugging Department, CNNP Nuclear Power Operations Management Co., Ltd., Jiaxing, Zhejiang, 314300, China

Abstract: Compressed air system provides compressed air what the whole nuclear power plant needed, and needs to meet the operation and Maintenance of the power facilities of all plant. With the experience during debugging of the compressed air system of Fangjiashan Nuclear practical, demonstrated the Reliability of the overall design of the system in terms of supply capacity of the system, isolate control and packing capacity at accident conditions; At the same time it has made a number of field-proven reasonably practical measures.

Key words: Compressed air, Debugging, Loss of air pressure, Seal

0 前 言

核电厂压缩空气系统生产的压缩空气分配至全厂的气动控制器, 以满足所有厂房内动力设施运行和维护需求。系统应具有足够的供气能力和稳定可靠的隔离控制, 以及事故情况下持续供气的能力。系统虽不执行安全功能, 但是在全厂失去气源情况下, 系统的许多安全级贮罐需要为某些安全级系统执行安全功能时提供仪表用压缩空气。本文结合压缩空气系统要点, 对系统功能进行可靠性论证。

1 系统运行要点

方家山核电厂压缩空气系统为 3 部分:

(1) 压缩空气生产系统(SAP): 包括 4 台主空气压缩机和 1 号、2 号机组各 2 台应急空气压缩机, 及其相应的干燥、储存缓冲装置。

(2) 公用压缩空气分配系统(SAT): 主空气压缩机厂房(ZC) 出来后的压缩空气经综合技术廊道(GB 沟) 总管网分配到各个厂房的部分均属于 SAT, 提供电厂运行及停堆期间气动工具或设备检修所需用气。

(3) 仪表用压缩空气分配系统(SAR): 为全厂各厂房的气动控制装置提供所需仪表用压缩空气。

1.1 SAP

方家山核电厂设置了 4 台水冷无油螺杆主空

气压缩机。电厂正常运行及调试期间无特殊需求时 1 台为主机, 1 台为辅机, 另外 2 台备用, 可维持管网压力为 0.76~0.9 MPa; 安全壳压力试验等特殊工况(见 2.1 节)可根据需求做相应调整。产出的压缩空气经过 4 台干燥机及缓冲罐, 通过 GB 沟送至全厂。ZC 厂房控制室设有 1 套全系统控制器(ACS4000), 可对 ZC 子项全面控制。

1.2 SAT

ZC 通过 GB 沟分别向 1 号、2 号机组的核岛及常规岛供气。核岛侧分别至应急空气压缩机房(W215/254), 房间入口设有电动隔离阀 SAP069VA。进入房间前的管线有若干支路, 均为 SAT 各区域供气阀。1 号机组共 4 个支路的 14 个边界阀; 2 号机组共 4 个支路的 12 个边界阀。进入汽轮机厂房(MX)设有 1 个手动阀和 1 个气动快关阀(SAT002VA), 下游设有储气罐, 储气罐出口一路供常规岛内总环网, 另一路返回 GB 沟; 2 台机组汇总为 1 根 SAT 总管网供给外围及核辅助厂房(NX)用气。在 SAP 供气压力降至 0.76 MPa 时 SAT002VA 将保护关闭, 切断下游用气, 起到保护仪表用压缩气管网压力的作用。

1.3 SAR

正常运行时每台机组的 2 台应急空气压缩机均置远程位置; 1 台置基本负荷位, 另 1 台置备用位。当 SAP 管网压力降至 0.68 MPa 时, 基本负荷应急空气压缩机自动启动; 当 SAP 管网压力继续降至 0.66 MPa 时, 备用应急空气压缩机自动启动, 如图 1 所示。SAP 来气经干燥机后分为 2 路: 1 路供核岛; 另 1 路经基地式气动调节阀 SAP067VA 供常规岛。每个机组常规岛外置 2 个储气罐, 之后的布置和 SAT 类似。SAP067VA 会

在应急空气压缩机出口压力低于 0.58 MPa 时自动关闭, 切断下游用气。

SAR 设有多个安全级储罐, 为安全级系统在执行安全功能时提供仪表用压缩空气。

NX 三废区域的 SAT 和 SAR 均为 2 台机组共同供气, 同样设计的还有 BOP 子项以及设置在 1/2SAR252VA 之间的电气厂房通风冷冻系统及大气释放阀, 保障性较高。

应急空气压缩机和 SAR/SAT 布局说明如下:

应急空气压缩机不单是供给核岛用的仪表用压缩空气, 而是供给全厂所有的仪表用压缩空气, 且下游只有仪表用压缩空气; 不管是 SAR 还是 SAT 的 GB 沟总管网, 都只是从常规岛里引出来主要供给 BOP 子项用气, 而不是各自系统的“母管”。

2 压缩空气系统调试若干典型案例

2.1 安全壳整体试验(A类试验)

安全壳整体试验是将安全壳内部空气压力加至设计压力 0.42 MPa, 测量安全壳及其部件的总泄漏率。在此期间, 安全壳内空气压力提高到设计压力的 1.15 倍(即 0.483 MPa)进行强度试验。试验用气由主空气压缩机提供。

以 2 号机组 A 类试验为例进行分析。依据安全壳整体试验大纲要求安全壳加压速率不得超过 12 kPa/h。由:

$$PV=nRT \quad (1)$$

式中, n 、 R 为常数; P 为空气压力; T 为空气温度; V 为空气体积。

忽略温度变化, 则 P 与 V 成反比。初始值 $P_0 \approx 100$ kPa, 安全壳有效容积 $V_0 = 49400$ m³, 设进气速率为 D , t 为打压时间, 则:

$$P_0(V_0 + Dt) = (P_0 + 12t)V_0 \quad (2)$$

最终可推算出: $D = 12V_0/P_0 \approx 5928$ m³/h。

ZC 主空气压缩机产气量每台 2100 m³/h, 干燥机耗气 300 m³/h, 启动 3 台主空气压缩机, 第 4 台作辅机可以满足试验需求, 与实际试验情况相吻合。

为排除干扰, 需隔离 1.2 节中所述的除 2 号机组打压管线以外的所有 SAT 隔离阀, 并做严密控制。2 台机组的仪表用压缩空气由应急空气压缩机供应, 并关闭 1/2SAP069VA, 杜绝 SAR 压力低而消耗 SAP 打压供气。而每台应急空气压缩

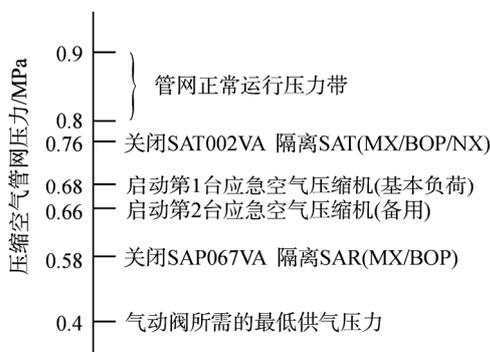


图 1 压缩气管网压力控制简图

Fig. 1 Diagram of Compressed Air Net Pressure Control
BOP—外围厂房

机的供气量为 1350 m³/h，满足全厂 1150 m³/h 的最大耗气量；现场实际验证表明，1 台应急空气压缩机运行即可满足需求。

综上所述：压缩空气系统设计的供气量完全能够满足安全壳整体试验要求，并且不影响其他用户用气。

压缩空气用户只有打压管线，用户单一，且随安全壳压力的上升，升压速率会有所变化，需要通过打压阀门组进行调节。如若遇到第 4 台空气压缩机频繁加卸载，可在满足安全壳湿度要求的前提下，通过调整干燥机耗气量来调节供气能力；当然，空气压缩机加卸载和干燥机的启停都会影响升压斜率。为此，最理想的方法是通过管线上的排气管来调节实际供气量，调节过程中要密切监视升压速率。

2.2 常规岛 SAT 气动快关阀 SAT002VA 调试

如前所述，SAT002VA 在 SAP 供气总管压力降至 0.76 MPa 时将保护关闭，压力信号引自手动阀（SAT001VA）和 SAT002VA 之间的压力变送器（SAT201MP）；待故障排除压力回升至 0.76 MPa 以上时，保护信号消失，但阀门会保持关闭状态，只能由主控室远程手动打开。当阀门保护关闭后，阀门下游压力势必会继续下降，如果下游压力完全丧失，SAT201MP 的值也已恢复，这时如果打开阀门，就如同对空排放（管道直径 159 mm），上游压力会急速下降，保护信号会再次发出。经调试验证：在下游无压力、上游压力 0.85 MPa 情况下，从开启阀门到再次发出保护信号阀门完全关闭只用时 9 s；而此时下游压力基本没变，等上游压力恢复后，下游压力又会丧失，导致阀门频繁动作，甚至会导致下游压力不能建立。

出现上述问题的主要原因在于阀门开启后流量过大，此处的耗气量远大于空气压缩机出气量。为减小阀门开启后流量过大问题，可将上、下游隔离阀进行适当限流。若限流上游隔离阀，则当气动阀打开时，总管网的波动变小了，但 SAT201MP 测量值下降会更快（SAT001VA 和 SAT002VA 之间管线很短）；而将下游隔离阀限流，则不会出现上述问题，SAT201MP 下降很慢，甚至可以不降。正常运行期间用气量不大，大修期间可根据需求调大开度，首先可以防止下游大面积漏气降低管网压力；其次可以在 SAT002VA 远

程打开时，不至于使上游管网压力骤降。综上所述，如果要限流，限流点必须设置在 SAT201MP 下游，才能保证 SAT201MP 测量值保持稳定。

另外，正常运行压力设计值为 0.76~0.9 MPa，而 SAT002VA 动作定值为 0.76 MPa，导致阀门动作频繁。为了使系统更加稳定，可将正常运行压力提高至 0.8~0.9 MPa，或者降低阀门动作定值，但要保证压力下降时，快关阀需要在基本负荷应急空气压缩机启动前关闭。经过调试期间现场验证，定值设成 0.72 MPa 时，考虑最恶劣工况，SAT002VA 下游排空，阀门保护完全关闭后，系统压力大于 0.68 MPa，不会导致应急空气压缩机误启动。且若限流点设置在下游，效果更佳。

2.3 SAR 自保持试验

SAR 的核心要求之一在于当核岛部分许多安全级系统和部件失效时，仍能维持系统及部件的运行。因此，设有安全级储罐来为某些安全级系统在执行安全功能时提供仪表用压缩空气，如安全壳厂房（RX）设有压缩空气罐（SAR003BA），以保证在失去气源的情况下，24 h 内将反应堆由热停堆带入冷停堆工况过程中用到的下泄管线上的气动阀 RCV002/003/007/008/009VP、低压下泄 RCV-RRA 管线上的 RCV310/082VP、辅助喷淋管线上的 RCV227VP 的必要操作，再如储气罐 GCT001/002/003BA 设计容量需要在失去气源情况下保证大气释放阀 GCT131/132/133VV 连续工作 6 h 等；此外还设有 SAR019/020/021/022BA、SAR008/009BA、SAR023/024/025BA。调试项目自保持试验 TP1SAR52 已经完成，结果合格，将针对其中要求最高的 SAR003BA 进行理论验证。

根据厂家提供阀门结构图所知阀门参数：RCV002/003/007/008/009/227/082VP 这 7 个阀门相关尺寸参数一样，均为双气囊隔离阀，行程 $S=17$ mm，气囊直径 $D=490$ mm，动作 1 次的有效容积为 $V_1=2S\pi D^2/4=0.00641$ m³。

试验时要求 RCV310VP 作为通断阀使用，定位器不必使用空气；同样可算出 RCV310VP 动作 1 次的有效容积为 $V_2=0.00322$ m³。

减压阀均调至 0.4 MPa，模拟最不利工况，备用空气压缩机失效，即压力降至 0.66 MPa 时开始试验。参考式（1），可以算出阀门完成所有要求动作所需要的空气总量（标准状况）为

3.13458 m³。

同理,完成所有要求动作后 SAR003BA 的压降为 0.1 MPa。

根据 SAR 自保持试验测出实际压力损耗 $\Delta P=0.11$ MPa。

实际试验中阀门电磁阀动作过程中的耗气、气囊实际储气误差、阀门气囊到气罐之间接头漏气的损耗以及就地仪表读数的误差等都会导致压力损耗。试验中测得 22 h 的静态泄漏量： $\Delta P_{22}=0.088$ MPa,最后算出试验最终压力为 0.462 MPa,符合 24 h 后罐内压力大于 0.4 MPa 的准则要求。因此,SAR003BA 的设计完全能够满足用户使用需求。

从试验结果可以看出,压力损耗较理论值相差较大。主要原因在于方家山核电厂反应堆厂房 SAR 管线在总阀 SAR500VA 后全部管线(包括配气盘上的所有活接、密封卡套等)均设计为铜质材料,当压力波动较大时,密封性受到影响;且由于安装精度不够,每个阀门的配气管线上的近

40 个接头多处发生漏气现象,有的甚至接头爆裂;后经反复检漏-拆装-检漏,直至漏气情况基本解决,试验得出的结果满足要求。

后期运行还需密切关注上述问题,必要时相应更换更加可靠的材料;另外 SAR003BA 出口供气管设有减压阀 SAR610VA,可调范围为 0.4~0.9 MPa;建议将压力适当调低,略高于下游用户需求压力 0.4 MPa 即可。降低下游管线压力,不仅可以减少静态泄漏率,也可以大幅降低在电磁阀动作时压力波动引起的泄漏,提高系统的可靠性。

3 结束语

方家山核电机组的压缩空气系统总体设计合理,满足全厂用户的运行、维修需求。若运行、维修人员在执行相关工作时能够关注并掌握本文所述各要点,甚至能采取更加合理的措施,则对本系统乃至整个电厂的安全运行将会十分有益。

(责任编辑:马 蓉)