

某核电堆型蒸汽发生器排污系统设计改进

韩世超¹, 赵嘉明², 王翠芸², 赵斌²

(1. 中国核电工程有限公司 郑州分公司, 郑州 450052; 2. 中国核电工程有限公司, 北京 100840)

摘要: 根据全范围事故分析结果, 在发生蒸汽发生器传热管破裂(SGTR)事故中, 为使发生故障的蒸汽发生器水位不会上升太快, 需通过蒸汽发生器排污系统排污管线来控制故障蒸发器的水位和压力。通过对蒸汽发生器排污系统进行设计改进, 提高系统的设计标准, 将破损蒸汽发生器内漏液排向内置换料水箱, 使破损蒸汽发生器降压, 同时限制破损蒸汽发生器水位, 防止破损蒸汽发生器满溢, 满足蒸汽发生器排污系统在设计基准事故工况下承担安全功能的要求。改进后的蒸汽发生器排污系统满足国内三代核电技术的要求, 为国内三代核电的安全性提供理论依据。

关键词: 蒸汽发生器排污; 安全功能; 传热管破裂事故

中图分类号: TM623

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2016)03-0045-03

Design Improvement of Steam Generator Blowdown System

HAN Shichao¹, ZHAO Jiaming², WANG Cuiyun², ZHAO Bin²

(1. Zhengzhou Branch, China Nuclear Power Engineering Co., Ltd., Zhengzhou 450052, China;

2. China Nuclear Power Engineering Co., Ltd., Beijing 100840, China)

Abstract: According to the results of the full range of accident analysis, in case of steam generator tube rupture, in order to make affected SG water level will not rise too fast, and need to control the affected SG water level and pressure by steam generator blowdown system. According to design improvement of steam generator blowdown system, increase the system design bases, the blowdowns are routed to the IRWST inside the containment, in order to depressurize affected SG pressure and control affected SG level, to prevent the affected steam generator is filled with water, meet the requirements of steam generator blowdown system in the design basis accident under the safety function. The improvement design can satisfy the third generation nuclear power technology, provide theoretical basis for the safety of the third generation nuclear power in China.

Key words: steam generator blowdown; safety function; SGTR

蒸汽发生器排污系统是为防止凝汽器泄漏或一回路向二回路的泄漏而导致二回路水的污染, 为了将二回路系统的水质保持在电站正常运行得允许值内。蒸汽发生器排污系统的功能是收集和处理蒸汽发生器的排污水。

根据全范围事故分析结果, 假想的蒸汽发生器传热管破裂(SGTR)事故发生后, 事故后撤过程中破损蒸汽发生器环路二次侧压力控制依赖蒸汽发生器排污系统, 否则破损蒸汽发生器的压力无法降下

来, 因此蒸汽发生器排污系统在设计基准事故中要承担一定的安全功能。

在目前的蒸汽发生器排污系统设计中, 在 SGTR 工况下, 为了限制破损蒸汽发生器水位的增加, 排污系统手动恢复运行进行最大流量排污, 将排污水冷却后排放到核岛废液排放系统, 防止破损蒸汽发生器满溢。但是需要指出的是, 蒸汽发生器排污系统壳外部分, 安全壳隔离阀下游的管道及设备以及废液排放系统均为非安全级非抗震, 因此目前设计无法保证其在设计基准事故下的可用性。根据蒸汽发生器排污系统在设计基准事故工况下所需承担安全功能, 需要对该系统的设计标准进行适当提高, 以提高该系统在应对设计基准事故中的可用性。

收稿日期: 2015-10-28

作者简介: 韩世超(1985), 男, 吉林通化人, 工程师, 学士, 主要从事核反应堆工程设计工作(e-mail) hansc@cnpe.cc。

1 设计改进方案

SGTR 事故工况下, 破损蒸汽发生器二次侧的水为放射性水, 如果由于蒸汽发生器满溢而导致放射性水排向环境或安全壳外厂房, 就会造成放射性向环境释放。

本方案通过从位于安全壳内的蒸汽发生器排污管线上引出排水管线, SGTR 事故工况下, 开启排水管线上的隔离阀向安全壳内的内置换料水箱(IR-WST) 排水。在每条排水管线上设置两台并联的隔离阀。增加的排水管线为安全 2 级, 抗震 I 类, 阀门为安全 2 级, 抗震 1A 类, 以实现蒸汽发生器排污系统承担的安全功能。另外, 在排放管线末端设置一台排放装置, 其淹没在 IRWST 水面以下, 用于增加排放的汽、水或混合物与 IRWST 内冷水的接触面积。当 SGTR 事故后期需要进行排放操作时, 操纵员手动开启相应的隔离阀, 蒸汽发生器内的放射性水依靠压力差自动进行排放。

在 SGTR 事故中, 短期阶段(到破口流量终止) 不考虑排污系统运行。在长期阶段(计算到达余热排除系统接入条件), 为使一回路系统达到余热排除系统接入状态, 需打开新增隔离阀, 将破损蒸汽发生器内放射性水通过增设的安全级管线排向内置换料水箱, 使破损蒸汽发生器降压, 同时利用排污系统限制破损蒸汽发生器水位, 防止破损蒸汽发生器满溢。

2 设计改进计算

2.1 设计改进输入条件

根据 SGTR 事故工况的全范围事故分析结果, 以下参数作为排放管路设计的输入条件:

- 1) 排水流量 $\geq 8.4 \text{ kg/s}$ 。
- 2) 排水总量 $\geq 100 \text{ t}$ 。
- 3) 排水压力见图 1。
- 4) 排水温度见图 2。

2.2 排放管路配置及相关计算

由于排放水是蒸汽发生器二次侧的高温、高压的接近饱和态的水, 因此不能用常规的单相的流体分析软件计算, 这里使用 RELAP5 建立计算模型。

初始假设排放管线采用公称直径为 50 mm 的管道, 外径为 60.3 mm, 壁厚为 5.54 mm。根据布置专业已完成的初步管线布置参数, 对最长的一条蒸

汽发生器排放管线建立了 RELAP 计算模型。用边界条件(恒定的温度和压力) 模拟破损蒸汽发生器中的水的排放状态, 对每一段管道都进行了细致地模拟, 使用能量损失系数模拟弯管、弯头、阀门和三通的局部阻力损失, 对内置换料水箱进行了简单的模拟。采用 RELAP5/SCDAP Mod3.4 程序分别计算了不同温度和压力情况下的排污流量, 计算结果见图 3 和图 4。

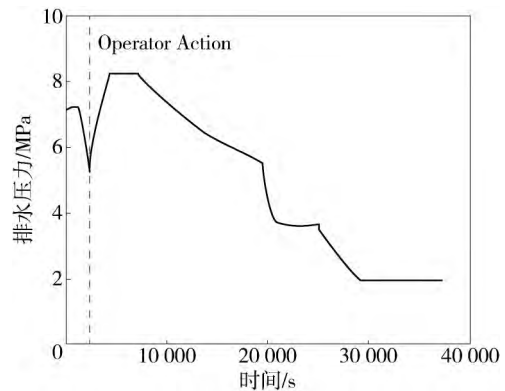


图 1 蒸汽发生器排污位置压力曲线

Fig. 1 Pressure curve of steam generator blowdown position

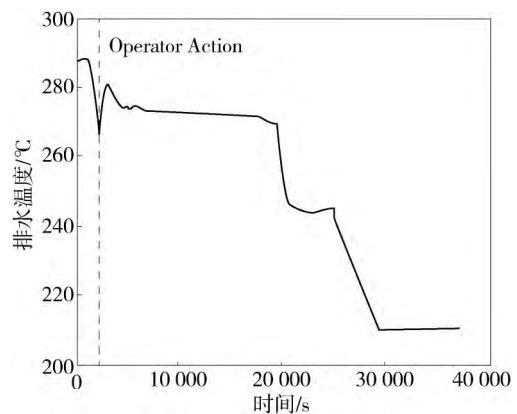


图 2 蒸汽发生器排污位置温度曲线

Fig. 2 Temperature curve of steam generator blowdown position

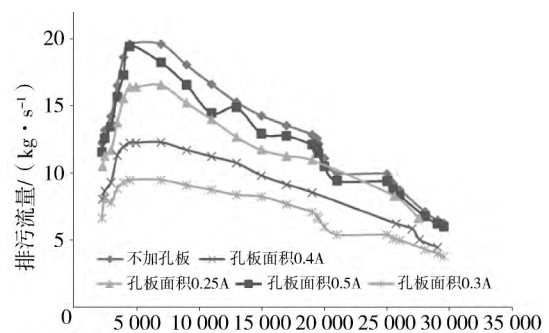


图 3 质量流量曲线

Fig. 3 Mass flow curve

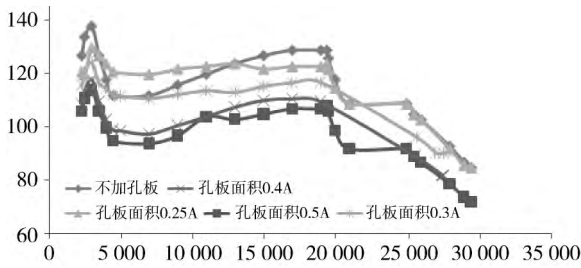


图4 管道出口处的汽相流速曲线

Fig. 4 Gas flow velocity curve of pipe outlet position

经计算, 从 2 300 s 起, 需经过 1.68 h 排水量达到 1 00 t。在 25 500.3 s(压力 3.337 MPa) 之前, 排水流量均大于 8.4 kg/s。设计者认为事故后期, 特别是蒸汽发生器内压力降到 3.337 MPa 以后, 不需要仍保证 8.4 kg/s 的流量要求。

3 流程设计

3.1 管线设置

新增排放管线采用公称直径 DN50, 从安全壳内每个蒸汽发生器两条排放管路的母管上接出, 三条排放管线在并联的隔离阀之后合并成一根母管, 通向 IRWST, 流程简图见图 5。

3.2 阀门设置

在每台蒸汽发生器的排水管线上各设置两台并联的电动隔离阀, 分 A、B 列供电, 并由柴油机加载。由于该管线末端直接与安全壳大气相通, 因此该隔离阀为安全壳隔离阀, 根据安全壳隔离阀设置原则, 在壳内设置一道阀门, 加上壳外已有的隔离阀满足安全壳隔离要求。

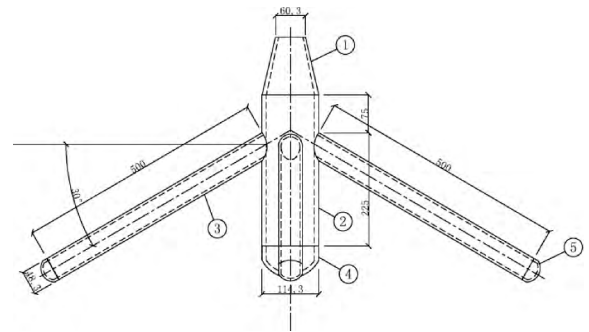
在正常运行及其他事故工况下, 这些新增安全壳隔离阀均处于关闭状态。只有在 SGTR 事故后期, 操纵员可根据规程, 监测事故蒸汽发生器的状态, 通过在主控室手动开启和关闭排污系统新增的电动隔离阀来调节事故蒸汽发生器的压力和水位。

为防止排水管线上电动隔离阀的误开启, 拟采取行政隔离的方法。具体为, 电站正常运行期间, 在配电柜上切断 6 台隔离阀的电源, 事故后根据需求进行再供电, 防止阀门误开启。

3.3 排放装置

排水管线进入内置换料水箱后设置一个卸压喷头, 淹没于 IRWST 水面以下, 控制蒸汽在水箱内的分布, 增加蒸汽与冷水的接触面积, 从而增强蒸汽的凝结效果。卸压喷头设有 4 个 DN40 的支管,

支管向下倾斜 30°, 喷头的支管向下倾斜一定角度有助于使蒸汽在水平和竖直方向远离喷头, 从而增加蒸汽与水的接触面积, 也有助于在喷头运行期间增强内置换料水箱内水的混合, 并且可以使得在蒸汽流量较低时防止内置换料水箱内的水回流。排水能够达到足够的排放流量, 并且产生的压降是可接受的。



注: ①——大小头(2"×4"); ②——钢管(4"); ③——钢管(1.5"); ④——管帽(4"); ⑤——管帽(1.5")。

图5 卸压喷头

Fig. 5 Depressurization sparger

3.4 新增管线流程图

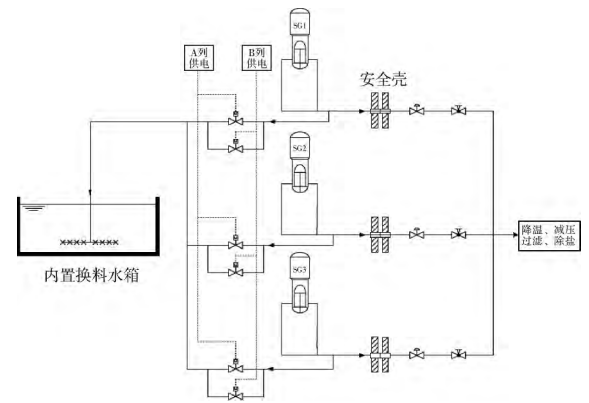


图6 系统流程图

Fig. 6 System flow diagram

4 结论

由于原蒸汽发生器排污系统设计壳外部分的管道和设备为非安全级和非抗震级, 因此无法保证其在设计基准事故下的可用性。通过在安全壳内排污管线上增设安全级排水管线, 实现了 SGTR 事故中通过排污系统调节破损蒸汽发生器的水位和压力, 防止破损蒸汽发生器满溢, 从而满足蒸汽发生器排

(下转第 53 页 Continued on Page 53)

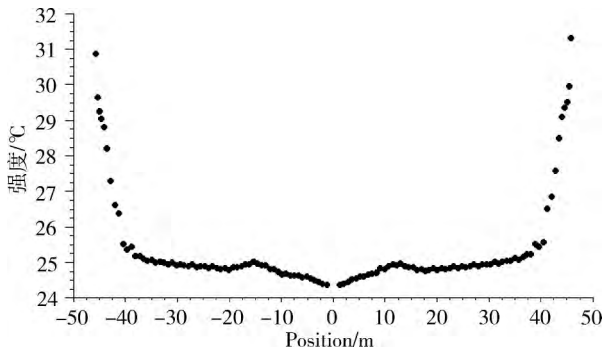


图6 填料区顶部横截面水温速径向分布

Fig. 6 Upper filling of cross-sectional area water temperature radial distribution

料厚度和降低外围填料厚度,即增大外围空气流速,实现外围循环水的进一步冷却。最终实现填料分布和填料内空气动力场的良好匹配,实现冷却塔整体热力性能的最大化。

通过上述分析,初步得到填料非均匀布置方案,即减小外围填料厚度、增大内围填料厚度。暂定沿径向以0~0.3、0.3~0.75和0.75~1.0为界分区,填料高度布置为2.25m—2.0m—1.75m的非等高填料出塔水温最低。

5 结论

1) 从综合经济性看,1机1塔(高位收水塔)与1机2塔(高位收水塔)方案基本相当,1机1塔方案从占地面积、外界侧风及塔群效应对冷效影响、水汽飘滴及雾羽扩散等方面看,均较有优势,推荐采用1机1塔(高位收水塔)方案。

2) 冷却塔采用高位收水装置后,能有效降低水泵几何扬程,节省运行费用。淋水面积越大,采用高位收水装置的经济优势越大。

3) 冷却塔造价对配置方案选择影响很大,冷却塔配置需结合总图布置等进行详细技术经济比较,初设和施工图阶段冷却塔准确定位后需再核实地质资料,并对冷却塔结构尺寸和造价资料进行复核。

4) 根据数模试验结论,高位收水塔应进行塔内填料布置深度优化,即减小外围填料厚度、增大内围填料厚度。最终实现冷却塔整体热力性能的最大化。

参考文献:

[1] 金薰卿,谢化一,倪季良,等. 高位收水冷却塔的设计 [J]. 中国电力,1993(6): 39-42.
JIN X Q, XIE H Y, NI J L, et al. The process design of the super high-level water collecting cooling tower [J]. Chinese Electric, 1993(6): 39-42.

[2] 赵云驰,侯燕鸿,王东海,等. 超大型高位收水冷却塔工艺设计探讨 [J]. 给水排水,2009,35(11): 69-72.
ZHAO Y C, HOU Y H, WANG D H, et al. Discussion of the process design of the super high-level water collecting cooling tower [J]. Water & Wastewater Engineering, 2009, 35(11): 69-72.

[3] 赵云驰,侯燕鸿,王东海,等. 超大型自然通风冷却塔工艺设计探讨 [J]. 电力建设,2009,30(10): 67-69.
ZHAO Y C, HOU Y H, WANG D H, et al. Discussion of the process design of the super natural draft wet cooling tower [J]. Electric Power Construction, 2009, 30(10): 67-69.

[4] 费全昌. 我国冷却塔应用现状及面临的挑战 [J]. 勘测设计, 2014, 2(4): 29-33.
FEI Q C. Applications and challenges of cooling tower in China [J]. Electric Power Survey & Design, 2014, 2(4): 29-33.

[5] 吴艳艳. 自然通风高位收水冷却塔三维热力特性的数值模拟与收水装置的优化研究 [D]. 济南: 山东大学能源与动力工程学院, 2015.

(责任编辑 郑文棠)

(上接第47页 Continued from Page 47)

污系统在SGTR事故下承担安全功能的要求。论文结论如下:

1) 经计算,设置公称直径为DN50的排放管线满足事故分析要求的排放流量和总排水量。

2) 排放管线上设置的隔离阀满足安全壳隔离的要求。

3) 新增管线不会对系统在其他工况下的运行产生影响。

参考文献:

[1] 中国核电工程有限公司. 蒸汽发生器排污系统手册 (CP03XTTBXTS02) [M]. 北京: CNPE, 2015.

[2] 中国核电工程有限公司. 运行技术规范(0426XOTSX03) [M]. 北京: CNPE, 2011.

[3] 张往锁,曹夏昕. 非能动余热排除系统敏感性分析 [J]. 原子能科学技术, 2013, 47(3): 409-415.
ZHANG W S, CAO X X. Sensitivity analysis of passive residual heat removal system [J]. Atomic Energy Science and Technology, 2013, 47(3): 409-415.

(责任编辑 高春萌)