

DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2015.04.006

二代改进型核电厂严重事故后安全壳压力控制研究

雷宁博, 石雪焱

(中国核电工程有限公司, 北京 100840)

摘要: 安全壳做为核电厂的最后一道安全屏障, 事故后起着包容放射性产物, 保护公众和环境免受辐射危害的重要作用。采用一体化严重事故分析程序建立了二代改进型核电厂田湾 5 & 6 号机组的模型, 考虑了不同的安全壳压力控制系统, 对典型事故序列下安全壳内压力变化进行了分析, 给出了严重事故后的安全壳压力控制手段。研究结果对二代改进型核电厂严重事故缓解提供了参考。

关键词: 二代改进型; 临时喷淋; 安全壳过滤排气; 严重事故

中图分类号: TL364

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2015)04-0043-04

Research on the Control of Containment Pressure of M310 + Under Severe Accident Condition

LEI Ningbo, SHI Xueyao

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

Abstract: As the last safety barrier, containment plays an important role of containing fission products and protecting public and environment from the harm of radiation under accidents. In this paper, the model of M310 + in Tianwan NPP Unit 5 & 6 is set up by modular severe accident analysis code, systems for controlling of containment pressure are considered, and the variation of containment pressure under typical accident sequences is analyzed, finally the methods on control of containment pressure under severe accident are gained. The results can be used for the mitigation of severe accident happening in M310 +.

Key words: M310 +; temporary spray; EUF; severe accident

在福岛事故之后, 核电厂的安全性得到了公众的广泛关注, 核安全监管机构也对国内新建核电项目的安全性提出了更高的要求, 特别是机组严重事故的预防和缓解能力。安全壳做为核电厂最后一道安全屏障, 在严重事故后其完整性得到保持, 对放射性产物包容, 保护公众和环境免受辐射危害有重要意义。典型的三代核电厂如 AP1000、华龙一号, 设置了非能动安全壳热量导出系统, 在严重事故后可以排出安全壳内热量, 将安全壳压力保持在限值以下, 维持安全壳的完整性; 与之相比, 二代改进型核电厂如田湾 5 & 6 号机组的设计中没有考虑这样的设施, 因此, 需要通过其它途径来实现严重事故后对安全壳内压力的控制。

本文主要对田湾 5 & 6 号机组在严重事故后采用安全壳临时喷淋和安全壳过滤排气(EUF)措施对安全壳压力进行控制的方式进行了研究, 并对关键参数进行了分析, 给出了满足需求的系统配置。

1 系统说明

1.1 安全壳临时喷淋

田湾 5 & 6 号机组设置了安全壳喷淋系统用于设计基准事故下安全壳温度压力控制, 但在如全厂断电导致的严重事故情况下, 安喷系统无法正常运行, 此时为降低安全壳内压力和温度, 需要设置临时喷淋手段。

安全壳临时喷淋系统从换料水箱取水, 并考虑利用厂内外水源, 使用可移动式泵与水源相连, 铺设临时补水带为换料水箱补水。安全壳临时喷淋管线采用 2 条固定铺设的不锈钢管, 一条作为换料水箱取水管, 另外一条作为喷淋注水管, 事故后通过

收稿日期: 2015-11-10

作者简介: 雷宁博(1984), 男, 河南洛阳人, 工程师, 硕士, 主要从事反应堆严重事故计算分析(e-mail)leinb@cnpe.cc。

软管分别与移动泵入口和出口相联。喷淋时将1台车载式移动泵通过软管与接口连接,实现安全壳临时喷淋功能。整个流程如图1所示。

1.2 安全壳过滤排气

安全壳过滤排气系统(EUF)的原理是通过主动卸压使安全壳内的压力不超过其承载限值,从而确保安全壳的完整性。田湾5 & 6号机组安全壳过滤排气系统采用的主要设备为文丘里水洗器及金属过滤器,按照设备设计,可在严重事故后期环境条件下工作。其结构如图2所示。开启条件为严重事故后24 h内安全壳压力超过0.65 MPa,或者24 h后安全壳压力超过0.52 MPa。当安全壳压力下降至0.26 MPa以下时EUF系统关闭。

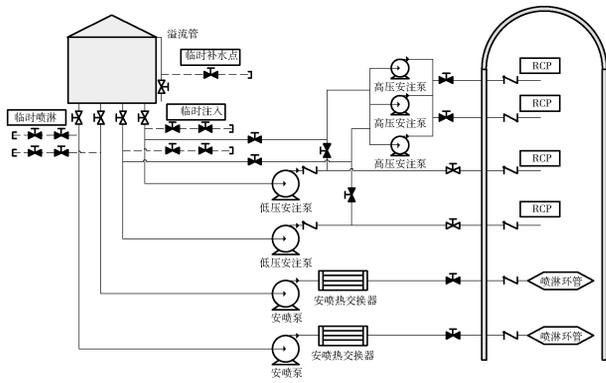


图1 安全壳临时喷淋流程简图

Fig. 1 Flow Diagram of Containment Temporary Spray System

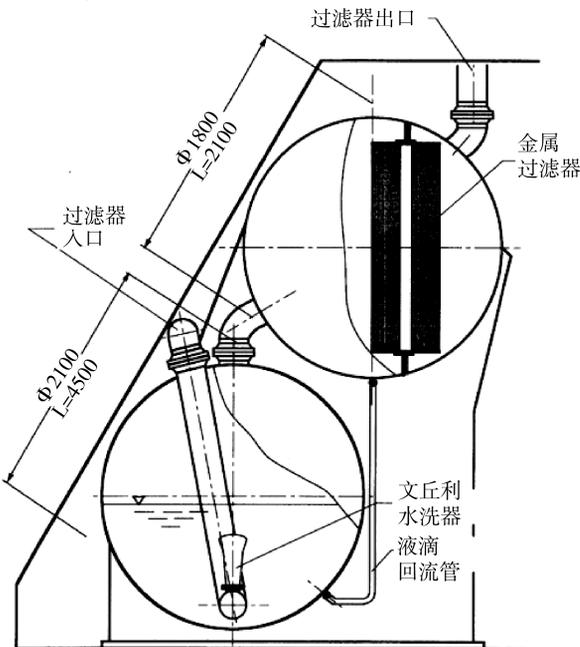


图2 安全壳过滤排气系统结构图

Fig. 2 Structure Diagram of EUF

2 电厂建模

本文采用一体化严重事故分析程序对田湾5 & 6号机组进行建模。

程序将一回路模拟为两个环路。一个为破损环路,另外两个环路集总为一个完好环路,整个一回路共划分了14个控制体,如图3所示。安全壳共划分为4个控制体,如图4所示。

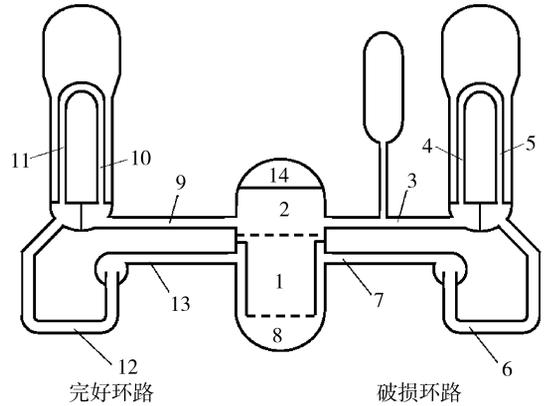


图3 一回路控制体划分图

Fig. 3 Node Diagram of RCS

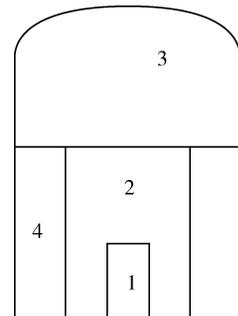


图4 安全壳控制体划分图

Fig. 4 Node Diagram of Containment

3 计算结果及分析

田湾5 & 6号机组在M310技术基础上进行了多项改进,提高了预防和缓解严重事故的能力,典型改进包括设置堆腔注水系统,在堆芯出口温度超过650℃后向压力容器与保温层之间注水以淹没下封头导出堆芯熔融物衰变热,以及设置SBO(station blackout,全厂断电)电源以在全厂断电事故后向重要设备供电。在本文的分析中,需要考虑这些改进措施对安全壳压力的影响。堆腔注水系统启动后,注入的水被下封头外表面加热为高温水或蒸汽,对安全壳来讲相当于附加的质能释放;SBO电源有效的情况下,堆腔注水系统以能动方式注入,

流量较大; SBO 电源失效时堆腔注水系统以非能动方式注入, 流量较小。不同的注入流量对安全壳压力变化也会产生影响。

3.1 分析工况与假设

基于以上分析, 本文选取了几种典型工况进行计算, 分别包括:

工况 1: 发生全厂断电事故, SBO 电源可用。

工况 2: 发生全厂断电事故, SBO 电源不可用。

工况 3: 发生全厂断电叠加冷段双端断裂失水事故, SBO 电源可用。

计算假设如下:

1) 安注系统仅有安注箱可用。

2) 堆芯出口温度超过 650°C 时手动打开稳压器安全阀。

3) SBO 电源可用情况下, CIS 能动系列在事故后 0.5 h 投运, 注入流量为 $360\text{ m}^3/\text{h}$, 持续 5.5 h; 之后考虑通过移动泵或消防水泵以 $40\text{ m}^3/\text{h}$ 流量注入, 持续 66 h。

4) SBO 电源不可用情况下, CIS 非能动系列在事故后 2 h 投运, 注入流量为 $40\text{ m}^3/\text{h}$, 持续 6 h; 之后考虑通过移动泵或消防水泵以 $40\text{ m}^3/\text{h}$ 流量注入, 持续 64 h。

5) 安全壳临时喷淋流量为 $240\text{ m}^3/\text{h}$, 在事故后 6 h 且安全壳压力达到 0.52 MPa 时投入, 持续 2 h; 之后考虑 3 h 的换料水箱补水时间, 安全壳压力再次达到 0.52 MPa 时临时喷淋可以投入, 持续时间仍为 2 h, 喷淋水温为 40°C 。

6) 事故后 72 h 安全壳喷淋系统恢复, 喷淋流量为 $1\ 010\text{ m}^3/\text{h}$ 。

7) EUF 系统在事故后 24 h 内安全壳压力达到 0.65 MPa 时开启, 在事故后 24 h 后安全壳压力达到 0.52 MPa 时开启; 安全壳压力下降至 0.26 MPa 时关闭。

图 5、图 6 及图 7 给出了各个工况下安全壳内压力变化情况。由图可知, 在安全壳临时喷淋系统和 EUF 的作用下, 事故后安全壳的压力得到了控制, 维持在 0.52 MPa 以下。

图 5 与图 6 对比可以看出, 工况 1 安全壳压力首次达到 0.52 MPa 的时刻要晚于工况 2。这是因为, 工况 1 下 CIS 系统能动系列投入, 其注入水流量相比于工况 2 下的非能动系列较大, 汽化较少, 因而减缓了安全壳内压力上升速度。

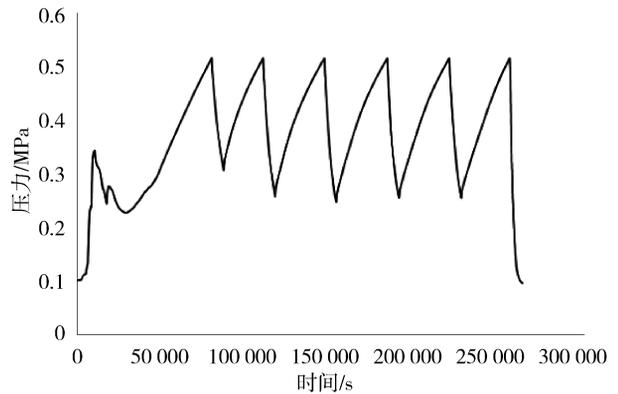


图 5 工况 1 安全壳压力变化

Fig. 5 Containment Pressure Variation Under Condition 1

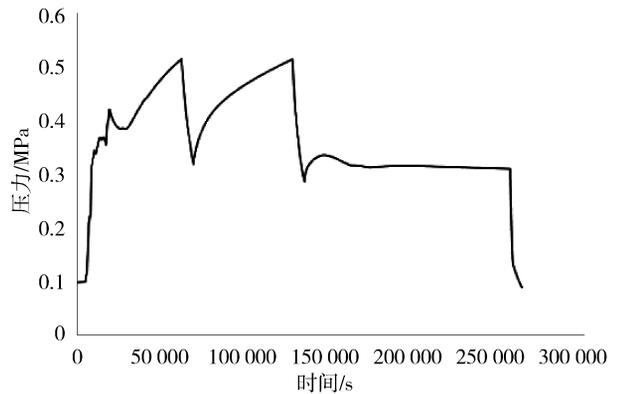


图 6 工况 2 安全壳压力变化

Fig. 6 Containment Pressure Variation Under Condition 2

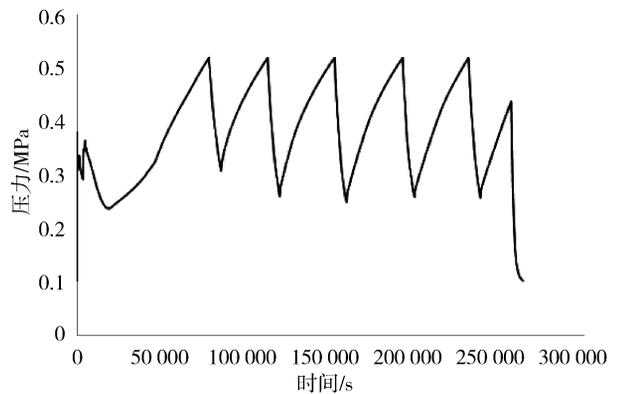


图 7 工况 3 安全壳压力变化

Fig. 7 Containment Pressure Variation Under Condition 3

图 6 与图 5、图 7 相比, 在后期安全壳压力基本维持平稳。这是因为, 工况 2 下安全壳压力第二次上升至 0.52 MPa 时, EUF 满足开启条件投入, 在临时喷淋暂停时安全壳压力依然高于 0.26 MPa , EUF 继续运行, 将安全壳压力维持在较低值, 之后临时喷淋一直不满足投入条件不再开启; 而工况 1 和工况 3 下, 安全壳压力第二次上升至 0.52 MPa 时,

EUF 满足开启条件投入, 在临时喷淋暂停时安全壳压力低于 0.26 MPa, EUF 关闭, 所以安全壳压力继续上升至达到临时喷淋和 EUF 再次启动条件, 启动后安全壳压力下降, 如此反复。

3.2 临时喷淋流量敏感性分析

为了研究不同临时喷淋流量情况下的安全壳压力变化情况, 分析了以下几种工况:

1) 工况 4: 发生全厂断电事故, SBO 电源可用, EUF 可用, 临时喷淋流量为 240 m³/h。

2) 工况 5: 发生全厂断电事故, SBO 电源可用, EUF 可用, 临时喷淋流量为 120 m³/h。

3) 工况 6: 发生全厂断电事故, SBO 电源可用, EUF 可用, 临时喷淋流量为 60 m³/h。

4) 工况 7: 发生全厂断电事故, SBO 电源可用, EUF 可用, 无临时喷淋。

图 8 给出了这几种工况下安全壳压力的变化情况。

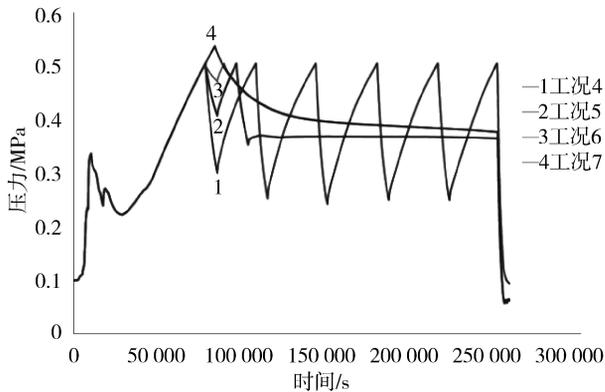


图 8 不同临时喷淋流量下的安全壳压力变化

Fig. 8 Containment Pressure Varies with the Mass Flow Rate of Temporary Spray

从图 8 可以看出, 分析的几种工况下, 除工况 7 以外, 安全壳压力都得到了控制, 维持在 0.52 MPa 以下。

对于工况 5, 安全壳压力第二次上升至 0.52 MPa 时, EUF 满足开启条件投入, 在临时喷淋暂停时安全壳压力依然高于 0.26 MPa, EUF 继续运行,

将安全壳压力维持在较低值, 之后临时喷淋一直不满足投入条件不再开启。

对于工况 6, 安全壳压力第二次上升至 0.52 MPa 时, 距临时喷淋因用水用尽停运不足 3 个 h, 换料水箱补水操作尚未完成, 故而临时喷淋无法投入, 此时 EUF 满足启动条件投入运行, 将安全壳压力维持在较低值, 之后临时喷淋一直不满足投入条件不再开启。

对于工况 7, 安全壳压力在事故后 24 h 内达到 0.52 MPa 但低于 0.65 MPa, EUF 在事故后 24 h 时才能投入运行, 因而安全壳最高压力超过了 0.52 MPa。

4 结论

本文以二代改进型核电厂田湾 5 & 6 机组为研究对象, 采用一体化严重事故分析程序建立了电厂模型, 对典型严重事故序列进行了分析, 得到了安全壳临时喷淋系统和安全壳过滤排气系统投入情况下安全壳内的压力变化, 并对不同临时喷淋流量的影响进行了分析, 得到以下结论:

1) 设置安全壳临时喷淋系统和安全壳过滤排气系统, 可以有效地控制严重事故后安全壳内的压力, 将其维持在限值 0.52 MPa 以下。

2) 不同的临时喷淋流量对安全壳压力变化存在影响, 当临时喷淋流量在 60 ~ 120 m³/h 之间时, 都能将安全壳压力控制在限值以下。

3) 单独依靠安全壳过滤排气系统也可将安全壳压力维持在限值以下, 但是过程中安全壳压力峰值高于 0.52 MPa。为安全考虑, 仍有必要设置安全壳临时喷淋系统。

参考文献:

- [1] MAAP-4, Modular Accident Analysis Program for LWR Power Plants, Volume 1: User Guidance [R]. US: FAUSKE & ASSOCIATES, INC, 1994.

(责任编辑 郑文棠)

(下接第 175 页 Continued from Page 175)

- [2] 魏利锋. 核电项目专业化集成运营管理模式研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2013.

- [3] 马亮, 必维. 打造高质安全的中国核电 [EB/OL]. 2013 http://www.meb.com.cn.

- [4] 贺禹. 核电站专业化运营管理研究 [D]. 武汉: 华中科技大学

学, 2004.

- [5] 肖林. 以加快发展高端服务业引领上海经济转型 [N]. 文汇报, 2009-08-24 (10).

(责任编辑 郑文棠)