

徐大堡核电厂丧失给水严重事故序列消氢分析

刘杨, 石雪焱

(中国核电工程有限公司, 北京 100840)

摘要: 丧失给水事故发生后, 若相关安全保护系统失效, 将导致一回路丧失热阱, 从而使堆芯发生裸露, 进一步发生锆水反应产生氢气, 氢气进入安全壳有可能发生燃烧或爆炸, 产生的高温高压将威胁安全壳的完整性。文章通过 MAAP4 程序计算分析了丧失给水引发的严重事故后氢气控制系统的消氢能力。

关键词: 丧失给水; 严重事故; 消氢; MAAP4

中图分类号: TL353

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2016)03-0036-04

Hydrogen Removal Analysis in Severe Accident Induced by Loss of Feed Water for XUDAPU Nuclear Power Plant

LIU Yang, SHI Xueyao

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

Abstract: After loss of feed water accident, if the safety features fail to start up, the primary will loss heat sink, which may lead core uncover to generate hydrogen by Zirconium-Water Reaction. The hydrogen release to the containment could cause deflagration or detonation, which would produce both high thermal and pressure loads on the containment. This paper use MAAP4 to analyze the hydrogen removal capability after the severe accident induced by loss of feed water.

Key words: loss of feed water; severe accident; hydrogen removal; MAAP4

严重事故后, 堆芯发生锆水反应导致氢气产生, 并经由一回路压力边界破口进入安全壳内, 氢气燃烧或爆炸产生的高温高压将威胁安全壳的完整性^[1]。AP1000 核电厂在设计上采用纵深防御思想应对氢气燃烧扩散火焰的问题。第一道防御是反应堆冷却剂系统的自动卸压系统(ADS)第4级阀门管线, 防止大量氢气释放至内置换料水箱; 第二道防御是环路隔间与安全壳壳体间混凝土墙隔离; 第三道防御是通过安全壳内自然循环提供稳定的氧气源; 第四道防御是换料水箱、PXS 隔间及 CVS 隔间的排气口设置在远离安全壳及贯穿件的区域, 以缓解氢气扩散火焰的威胁^[2]。

徐大堡核电站采用氢气点火器来控制严重事故后的氢气风险。核电厂考虑通过增加氢气点火器蓄

电池供电时间, 以及增加一定数量的非能动氢气复合器等改进手段, 加强其应对严重事故后安全壳内氢气风险的能力。根据目前徐大堡核电厂的设计, 共有 66 台氢气点火器, 8 台非能动氢气复合器。

本文通过建立严重事故分析模型, 选取丧失给水引发严重事故作为典型事故序列, 分析了严重事故后氢气控制系统的消氢能力, 验证了氢气控制系统的有效性。

1 分析与模型

本文使用严重事故一体化程序 MAAP4 进行严重事故过程中堆芯熔化、锆水反应、安全壳不同隔间内温度、压力、氢气体积分数分布等的计算。MAAP4 是完全一体化的严重事故程序, 包含了压水堆核电厂在假想的严重事故期间可能发生的许多重要的热工水力现象和裂变产物现象的模型。

MAAP4 的基本模型可模拟以下现象^[3]:

- 1) 反应堆冷却剂系统(RCS)热工水力。
- 2) 燃料包壳和水反应。

收稿日期: 2015-11-10

作者简介: 刘杨(1985), 女, 黑龙江人, 工程师, 硕士, 主要从事热工水力与安全分析工作(e-mail) liuyang@cnpe.cc。

- 3) 堆芯升温、熔化、迁移。
 - 4) 安全壳热工水力。
 - 5) 燃料和冷却剂相互作用。
 - 6) 熔融堆芯 - 混凝土相互作用。
 - 7) 氢气燃烧、点火器、氢气复合器模型。
 - 8) 裂变产物释放、输运和沉降。
- 计算中,安全壳控制体划分见图1。

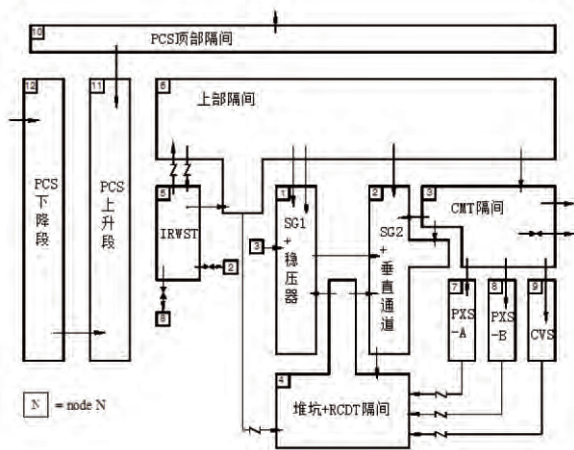


图1 安全壳控制体划分
Fig. 1 Containment partition

2 计算假设

2.1 事故假设

事故假设如下:

- 1) 非能动余热排出系统(PRHR) 失效。
- 2) 第一级、第三级、第四级自动降压系统失效。
- 3) 第二级 ADS 手动启动,堆芯出口温度大于 922 K 后延迟 20 min 打开。
- 4) 堆芯补水箱(CMT)、安注箱(ACC) 两列有效。
- 5) 安全壳内置换料水箱(IRWST) 重力注射管线、堆腔淹没管线、再循环管线两列有效。
- 6) 点火器在事故后 8 h 内有效。

2.2 事故工况

为了分析氢气控制系统对氢气风险的缓解作用,本事故序列分为以下两种工况进行分析:

- 1) 工况 1: 无氢气缓解措施。
- 2) 工况 2: 有氢气缓解措施。

3 计算结果

计算得到的事故序列进程见表1。图2~图8分别给出了一回路压力、堆芯出口气体温度、安全

壳压力、安全壳大气温度、较好混合隔间内的氢气体积分数、狭窄隔间内的氢气体积分数、氢气产量及消氢量等参数随时间的变化。

表1 事故序列进程
Tab. 1 Accident sequence

| 事件描述 | 时间/s |
|----------|----------|
| 反应堆停堆 | 3.8 |
| 主冷却剂泵停运 | 4 036.2 |
| CMT 启动 | 4 036.2 |
| PCS 启动 | 4 036.2 |
| CMT 排空 | 10 647.1 |
| 堆芯裸露 | 11 062.6 |
| ADS-2 开启 | 13 378.0 |
| 安注箱排空 | 13 820.3 |
| 堆腔淹没启动 | 16 906.8 |
| 堆芯向下腔室迁移 | 20 980.8 |
| 再循环管线开启 | N/A |

丧失给水发生后,事故初始一回路不会发生降压,一回路丧失正常热阱,当蒸汽发生器二次侧蒸干以后,一回路衰变热通过稳压器安全阀向安全壳内释放,导致安全壳压力上升,直到安全壳压力的上升触发 HI2 信号,将引发堆芯补水箱(CMT) 投入,随后堆芯暂时得到冷却,一回路压力开始下降。同时非能动安全壳冷却系统(PCS) 投入,对安全壳进行冷却。由于 ADS 自动启动失效,堆芯压力高,ACC 无法注入,随着 CMT 水箱排空,堆芯将发生裸露、熔化。

由于 ADS 自动动作失效,操作员在堆芯出口温度大于 922 K 后延迟 20 min 手动打开 ADS-2,一回路随即卸压,当一回路压力达到安注箱注入压头时安注箱自动投入。当堆腔淹没注入管线打开,IRWST 的水进入堆坑,随着堆坑被淹没,事故进程趋于稳定。

安全壳的主要隔间中,SG 隔间、安全壳上部隔间与 CMT 隔间比较宽阔,氢气混合较好;而 IRWST 隔间与 PXS 隔间是属于不利于氢气混合的狭窄隔间。

压力容器内产生的氢气主要通过 ADS-2 释放到 IRWST 中。从计算结果也可以看出,IRWST 隔间的氢气体积分数较其他隔间氢气体积分数最高(70%)。在增加消氢措施后,除 IRWST 以外的隔间氢气体积分数降低,并随着点火,安全壳隔间的

温度比无消氢措施时要高。但是由于 IRWST 隔间流通性差,氧气体积分数低,氢气点火器无法点燃隔间内的氢气,仍然造成 IRWST 隔间较高的氢气

体积分数。由于氢气的迅速燃烧,导致安全壳压力的迅速上升,同时导致 SG 隔间较高的大气温度,最高温度达到了 900 K。

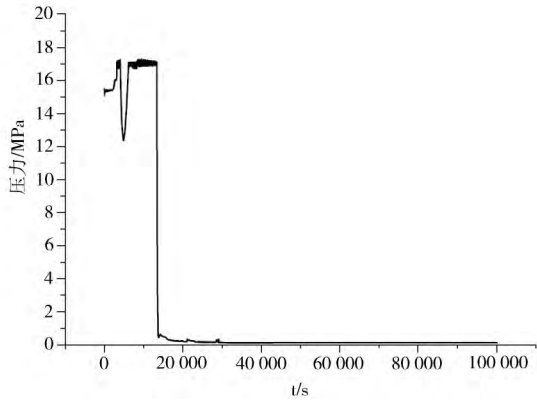


图2 一回路压力
Fig. 2 Primary pressure

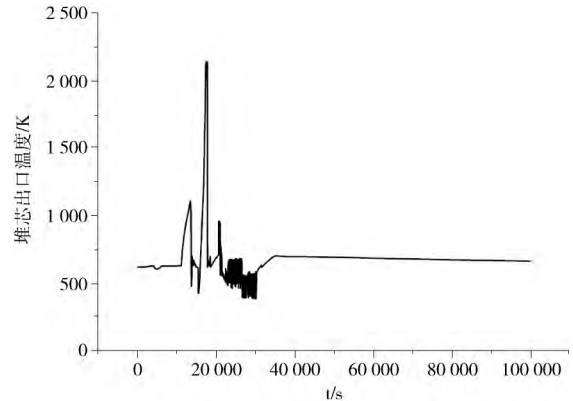


图3 堆芯出口气体温度
Fig. 3 Core exit gas temperature

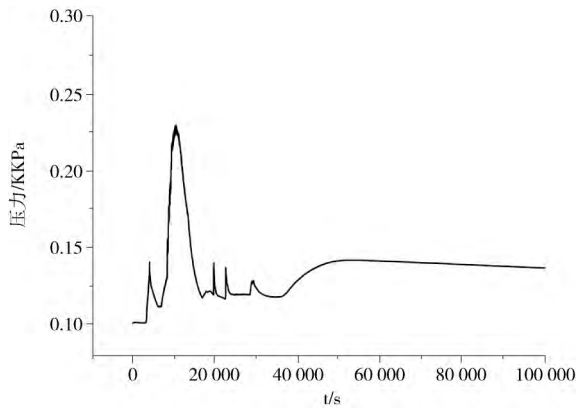


图4 安全壳压力
Fig. 4 Containment gas pressure

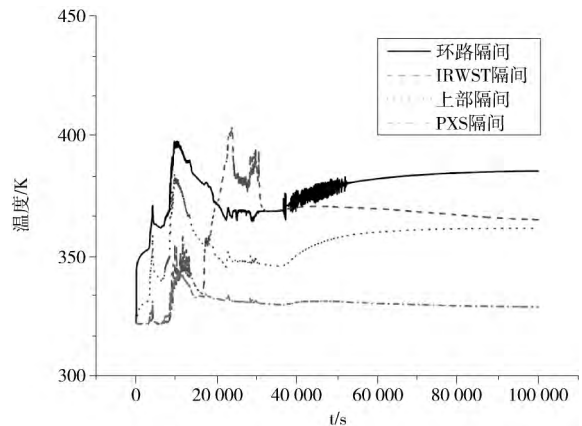


图5 安全壳大气温度(工况1)
Fig. 5 Containment gas temperature(case 1)

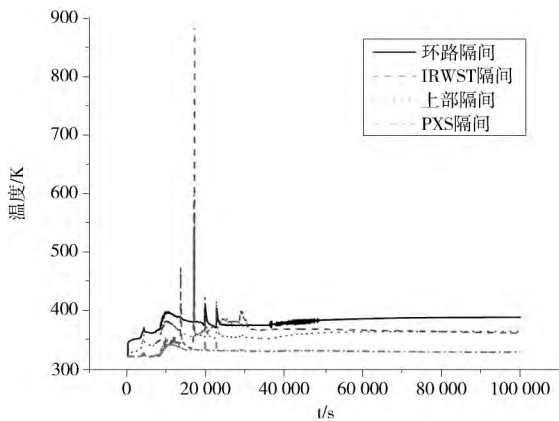


图6 安全壳大气温度(工况2)
Fig. 6 Containment gas temperature(case 2)

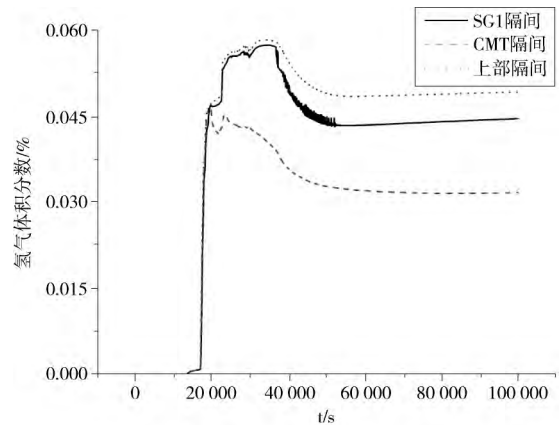


图7 较好混合隔间内的氢气体积分数(工况1)
Fig. 7 Hydrogen concentration in well mix compartment(case 1)

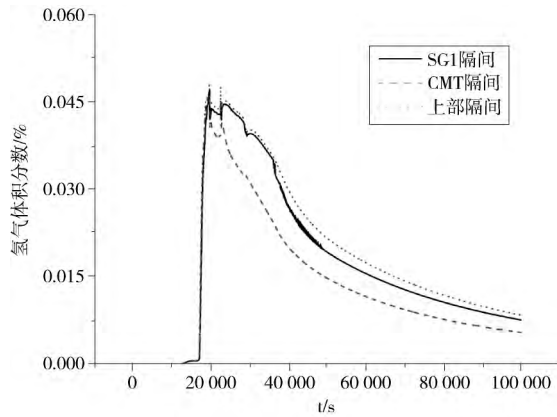


图8 较好混合隔间内的氢气体积分数(工况2)

Fig. 8 Hydrogen concentration in well mix compartment(case 2)

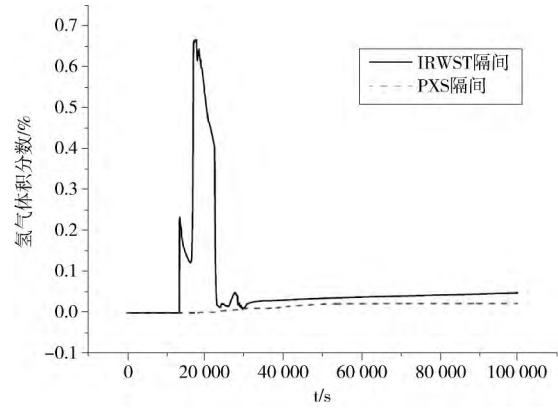


图9 狭窄隔间内的氢气浓度(工况1)

Fig. 9 Hydrogen concentration in strait compartment(case 1)

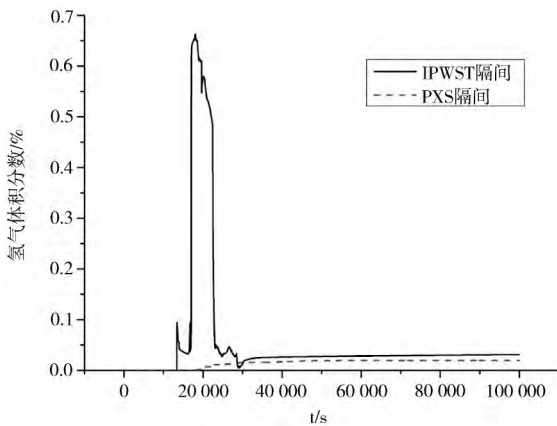


图10 狭窄隔间内的氢气体积分数(工况2)

Fig. 10 Hydrogen concentration in strait compartment(case 2)

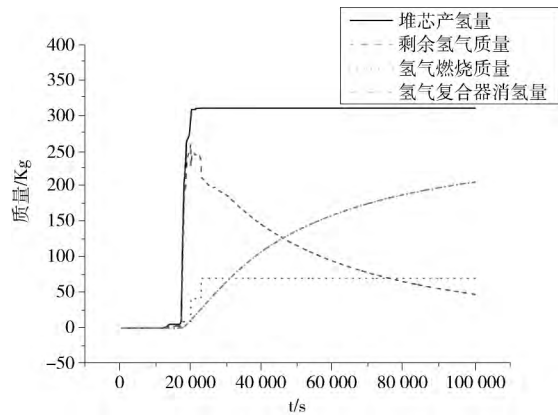


图11 氢气产量、消氢量(工况2)

Fig. 11 Mass of hydrogen generate and removal

消氢初始阶段大部分氢气是被氢气点火器消除的,随着氧气体积分数的下降,混合气体无法被氢气点火器点燃。随后,氢气复合器将剩余的氢气缓慢的催化反应,安全壳内氢气体积分数进一步下降。在事故后 24 h,共产生了 310 kg 氢气,其中 70 kg 被点燃,195 kg 氢气被复合器催化掉。

4 结论

丧失给水引发严重事故将导致安全壳各隔间内氢气体积分数上升,其中 IRWST 隔间的氢气体积分数最高,因为氢气在压力容器内产生后主要通过 ADS-2 释放到 IRWST 中。在增加消氢措施后,除 IRWST 以外的隔间氢气体积分数明显降低,同时

点火将导致隔间温度比无消氢措施时高。消氢初始阶段点火器消除大部分氢气,随后氢气复合器缓慢催化氢气反应,使安全壳内氢气体积分数进一步下降。

参考文献:

- [1] 濮继龙. 压水堆核电厂安全与事故对策 [M]. 北京: 原子能出版社, 1995.
- [2] 杜福伟. API000 核电厂氢气控制措施 [J]. 科技视界, 2014 (12): 259-260.
- [3] Fauske Associates LLC. MAAP4 modular accident analysis program for LWR power plants user's manual [M]. Project RP3131-02 (prepared for EPRI) ,1994.

(责任编辑 黄肇和)