

# AP1000 严重事故下的氢气源项及消氢措施分析

李京喜, 佟立丽, 曹学武

上海交通大学机械与动力工程学院, 上海 200240

**摘要** 采用一体化严重事故分析工具, 建立包括主热传输系统、专设安全设施、安全壳系统的 AP1000 的事故分析模型。根据 AP1000 概率安全评价选取典型事故序列, 同时叠加相关安全系统失效的严重事故进程进行模拟。结果表明, 中破口始发严重事故压力容器内会产生 624kg 的氢气, 安全壳隔间有氢气燃烧的风险。同时, 建立氢气控制系统模型, 选取热段中破口始发 (MB-LOCA) 的严重事故序列, 分析氢气控制系统的消氢效果, 结果表明, 氢气控制系统可以有效地将氢气浓度控制在安全限值以内, 采用 64 个点火器叠加 2 个非能动氢气复合器 (PARs) 可以有效降低点火次数。

**关键词** AP1000; 严重事故; 氢气源项; 氢气控制系统

**中图分类号** TL364<sup>+</sup>.4

**文献标识码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.21.003

## The Hydrogen Source and Hydrogen Mitigation Measurement during Severe Accidents for AP1000

LI Jingxi, TONG Lili, CAO Xuewu

School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China

**Abstract** AP1000 model, including Reactor Coolant System (RCS), Engineering Safety Features (ESFs), and containment, is built by using the integrated severe analysis code. According to AP1000 Probability Risk Analysis (PRA), several typical sequences are selected. The accident progressions are analyzed and hydrogen sources are investigated. It indicates that 624kg hydrogen will be generated in pressure vessel induced by MB-LOCA. The model of hydrogen control system, which consists of 64 glow-up igniters and two Passive Autocatalytic Recombiners (PARs), is built to analyze the effectiveness of removing hydrogen and the combustion modes are identified by the Shapiro triangular diagram. The results show that hydrogen concentration could be controlled within the safety limits by using 64 glow-up igniters and two PARs to protect the containment integrity from hydrogen deflagration or detonation.

**Keywords** AP1000; severe accident; hydrogen source; hydrogen control system

### 0 引言

各种风险研究表明, 在严重事故情况下, 氢气燃烧或迅速爆燃可能造成与安全有关的设备和系统的局部损坏, 甚至损坏安全壳的结构, 造成大量的放射性物质进入环境<sup>[1]</sup>。针对严重事故下安全壳内可燃气体控制, 中国最新颁布的《核动力厂设计安全规定》(HAF102) 明确要求<sup>[2]</sup>: 必须充分考虑在严重事故下控制可能产生或释放的裂变产物、氢和其他物质的措施。

经过多年的探索与实践, 针对严重事故情况下的氢气控制, 中国已经提出了多种缓解措施, 以限制氢气燃烧对安全壳完整性可能造成的威胁。这些措施大致可以归结为两类: 第一种是稀释氢气浓度, 控制安全壳内混合气体成分, 避免达到可燃浓度; 第二种是减小安全壳内的可燃气体成分, 这类措施有点火器、催化复合器等<sup>[3-4]</sup>。

到目前为止, 各国针对氢气燃烧模式以及燃烧对安全壳完整性的威胁进行了大量实验研究, 利用实验装置研究了氢

收稿日期: 2012-05-25; 修回日期: 2012-07-06

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2009CB724301); 国际热核聚变实验堆(ITER)计划专项(2009GB106006)

作者简介: 李京喜, 博士研究生, 研究方向为核能科学与工程, 电子信箱: lijingxi@sohu.com; 佟立丽(通信作者), 高级工程师, 研究方向为核能科学与工程, 电子信箱: lltong@sjtu.edu.cn

气-空气-水蒸气混合条件下的氢气燃烧和火焰加速行为,以获得足够数据建立燃爆转变的准则<sup>[5-6]</sup>。韩国利用 YGN (Younggwang)3、4 号机组的安全注射箱隔间的模型,以氦气代替氢气,对局部氢气行为开展研究实验,并利用实验数据对 HYCA3D 氢分析程序进行了验证<sup>[7]</sup>。同时,也有学者针对大型干式安全壳的非能动催化复合器的消氢效果进行大量分析,结果表明,采用合适的布置方案可以有效控制安全壳内氢气燃爆的风险<sup>[8-9]</sup>。

本文建立了 AP1000 的事故分析模型,分析直接注入管线破裂(DVI)、冷管段大破口失水事件(LB-LOCA)、自动卸压系统误启动(SPADS)、DVI 管线破裂叠加自动卸压系统失效(DVI+FailADS)以及热段中破口失水始发事件叠加第一级 ADS 手动启动成功(MB-LOCA),同时叠加相关安全系统失效的严重事故进程进行模拟,研究压力容器内氢气的产生特性,并分析氢气在安全壳隔间的浓度分布和风险以及氢气控制系统的消氢能力。

## 1 核电厂模型

本文建立的事故分析模型耦合了反应堆冷却剂系统热工水力计算以及安全壳的计算,安全壳被划分为 12 个节点,各节点由不同流道相连。非能动安全壳冷却系统(PCCS)模拟为一系列与壳内上部隔间节点相连的热阱,模型中使用了两个热阱分别模拟 PCCS 系统的顶盖与直壁。可以模拟水流以某一特定的速率在热阱外表面形成覆膜,采用蒸发模型来计算从安全壳外壁面节点到环段气流的热量与质量的输运。

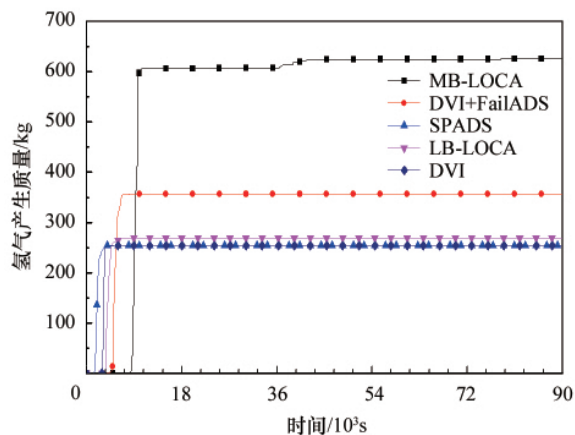


图 1 氢气产生质量

Fig. 1 Hydrogen generation mass

AP1000 核电厂氢气控制系统<sup>[10]</sup>由 2 个非能动氢气复合器(PARs)子系统和 64 个氢气点火器子系统组成。氢气复合器子系统的两台安全相关的 PARs 安装在安全壳内高于操作平台的区域,标高分别为 121.3 和 124.7m,距安全壳体均为 3.96m,布置点位于安全壳内均匀混合区域。点火器应用于严重事故,为非 1E 级,分成由不同电源供电。

## 2 计算结果与分析

### 2.1 氢气源项分析

根据一级概率安全评价分析结果,选取直接注入管线破裂(DVI)、冷管段大破口失水事件(LB-LOCA)、自动卸压系统误启动(SPADS)、DVI 管线破裂叠加自动卸压系统失效(DVI+FailADS)以及热段中破口失水始发事件叠加第一级 ADS 手动启动成功(MB-LOCA),同时叠加相关安全系统失效的严重事故进程进行模拟,所有序列都假设非能动安全壳冷却系统有效。图 1 和图 2 分别给出了各事故序列下的氢气产生质量和产生速率,各事故序列下,氢气产生的时间点明显有所不同,产生速率也不同。由图 1、图 2 可知,在 MB-LOCA 事故序列下,氢气产量最大,该事故下堆芯水位于 10260s (2.85h) 左右恢复,在堆芯裸露和再注水的时间内,锆水反应剧烈,氢气大量产生;在堆芯得到充分冷却后,氢气不再产生,稳定在 624kg 的总产量,约为 79.2%活性区包壳锆水反应产氢量,该序列下最大产氢速率约为 0.9kg/s;DVI+FailADS 序列产生约 356kg 的氢气,约为 45.2%活性区包壳锆水反应产氢量,其它序列的产氢量基本在 250kg 左右;在所分析的事故序列中

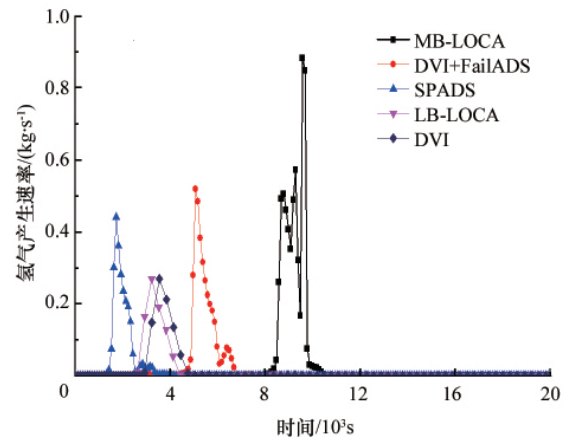


图 2 氢气产生速率

Fig. 2 Hydrogen generation rate

SPADS 序列产氢时间最早。

### 2.2 氢气风险分析

图 3 给出了安全壳中均匀混合隔间的氢气浓度,在均匀混合隔间中(包括蒸汽发生器 1 隔间、堆芯补水水箱隔间和安全壳上部空间),氢气浓度随着氢气产生而快速上升。氢气从

破口快速释放,在蒸汽发生器隔间产生一个峰值,向堆芯补水水箱隔间和安全壳上部大空间扩散。由于扩散作用,安全壳上部空间的氢气浓度快速上升,且较其它隔间高,维持在 11%左右。图 4 给出了安全壳上部空间的氢气燃烧模式,安全壳上部空间的氢气风险在事故前期处于非燃烧区,事故后期

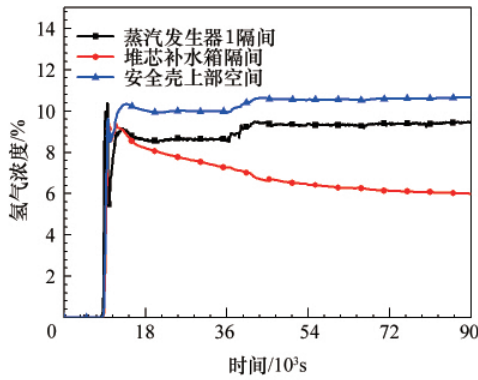


图3 安全壳均匀混合隔间的氢气浓度

Fig. 3 Hydrogen concentration in well-mixed compartments

进入燃烧区。

### 2.3 氢气控制系统的消氢效果分析

图5和图6分别给出只使用点火器以及联合使用点火器和PARs进行氢气控制的均匀混合隔间氢气浓度。均匀混合隔间中氢气浓度在早期迅速上升,从图5可以看出,仅使用点火器措施时氢气浓度会保持在6%左右。从图6可以看出,联合使用点火器和PARs时均匀混合隔间氢气浓度在事故后期会逐渐下降,这主要是由于PARs的长期消氢作用。

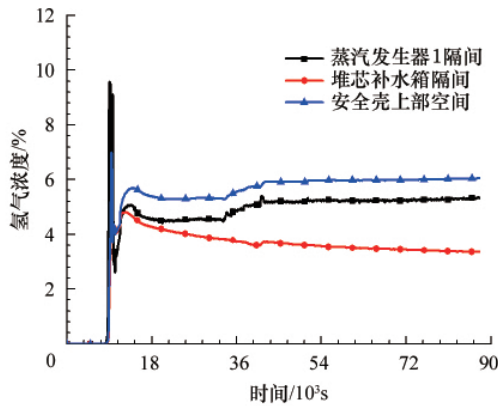


图5 均匀混合隔间中氢气浓度(点火器)

Fig. 5 Hydrogen concentration with igniters

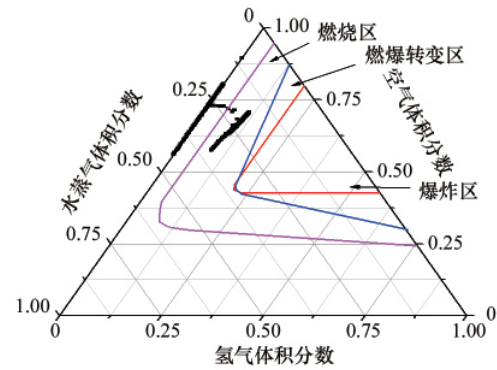


图4 安全壳上部空间氢气燃烧模式

Fig. 4 Hydrogen combustion patterns in the containment upper compartment

图7和图8分别给出只使用点火器以及联合使用点火器和PARs进行氢气控制的安全壳上部空间的氢气燃烧模式。可以看出,在氢气控制系统的作用下,安全壳上部空间的氢气不会进入慢速燃烧区,而是处于慢速燃烧区的边缘,氢气在达到燃烧限值时就被点火器主动点燃。从图8可以看出,由于PARs的作用,可燃气体燃烧风险向着远离燃烧区的方向发展。因此,在所分析的事故序列下,使用点火器以及联合使用点火器+PARs控制措施,氢气燃烧是可控的。

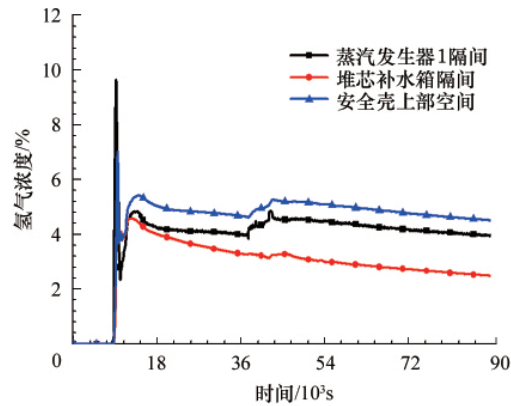


图6 均匀混合隔间中氢气浓度(点火器+PARs)

Fig. 6 Hydrogen concentration with igniters+PARs

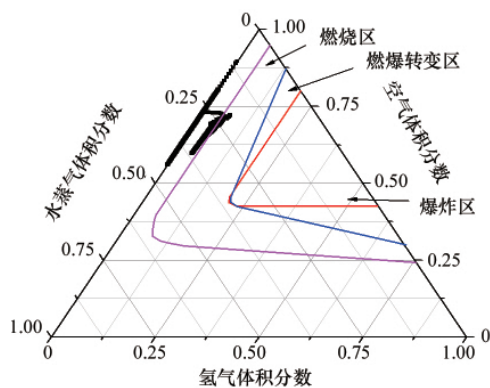


图7 安全壳上部空间中氢气燃烧模式(点火器)

Fig. 7 Hydrogen combustion patterns (igniters)

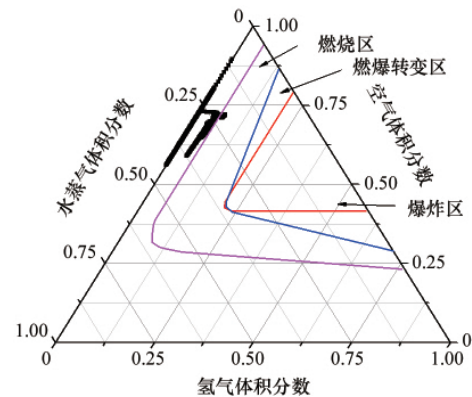


图8 安全壳上部空间中氢气燃烧模式(点火器+PARs)

Fig. 8 Hydrogen combustion patterns (igniters+ PARs)

### 3 结论

通过分析 AP1000 典型严重事故序列下的氢气源项及氢气风险,并对氢气控制系统的消氢效果进行分析,得出以下结论。

(1) 根据 AP1000 概率安全评价选取典型事故序列,即 DVI 管线破裂事故、冷管段大破口失水事故、ADS 误启动、DVI 管线破裂叠加 ADS 卸压失效以及热段中破口失水事故同时叠加相关安全系统失效的严重事故进程进行模拟,研究了压力容器内氢气的产生特性;通过氢气源项比较认为,热段中破口失水事故叠加第一级 ADS 手动启动成功在所选取事故序列下具有包络性,产生约为 79.2%活性区包壳锆水反应产氢量。

(2) 通过热段中破口始发的严重事故序列分析表明,氢气控制系统可以有效降低氢气浓度,将氢气浓度控制在安全限值以内。

#### 参考文献 (References)

- [1] Breitung W, Royl P. Procedures and tools for deterministic analysis and control of hydrogen behavior in severe accidents [J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2000, 202(2-3): 249-268.
- [2] 国家核安全局. 核动力厂设计安全规定 [S]. 北京: 国家核安全局, 2004.  
National Nuclear Safety Administration. Safety of nuclear power plant: Design[S]. Beijing: National Nuclear Safety Administration, 2004.

- [3] Blanchat T K, Stamps D W. Deliberate ignition of hydrogen-air-steam mixtures in condensing steam environments [R]. NUREG/CR -65530, SANDA94-1676. Washington D C: US Nuclear Regulatory Commission, 1997.
- [4] Arnould F, Bachellerie E. State of the art on hydrogen passive autocatalytic recombiner [C]. Proceedings of the 9th International Conference on Nuclear Energy (ICONE), Nice, France, April 8-12, 2001.
- [5] Dorofeev S B, Bezmelnitsin A V, Sidorov V P, et al. Turbulent jet initiation of detonation in hydrogen-air mixtures [J]. *Shock Waves*, 1996, 6(2): 73-78.
- [6] Cheikhraat H, Yahyaour M, Barret A, et al. Influence of hydrogen distribution on flame propagation [C]. Third European Combustion Meeting, ECM, Crete, Greece, April 11-13, 2007.
- [7] Choi Y S, Lee U J, Lee J J, et al. Improvement of HYCA3D code and experimental verification in rectangular geometry[J]. *Nucl Eng Des*, 2003, 226(3): 337-349.
- [8] Bachellerie E, Arnould F, Auglaire M, et al. Generic approach for designing and implementing a passive autocatalytic recombiner PAR-system in nuclear power plant containments[J]. *Nucl Eng Des*, 2003, 221 (1-3): 151-165.
- [9] Deng J, Cao X W. A study on implementing a passive autocatalytic recombiner PAR-system in the large-dry containment [J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2008, 238(7): 2554-2560.
- [10] 丁后林. 三门 AP1000 核电站安全壳氢气控制的设计特点[J]. 核电工程与技术, 2011(1): 6-11.  
Ding Houlin. *Nuclear Power Engineering and Technology*, 2011 (1): 6-11.

(责任编辑 马宇红,代丽)

·学术动态·

## “第四届全国恶臭污染测试与控制技术研讨会”征稿

**2012 年 10 月在山东省淄博市召开“第四届全国恶臭污染测试与控制技术研讨会”,会议由国家环境保护恶臭污染控制重点实验室主办。**

**征文范围:(1) 恶臭污染防治策略、行业标准的制定方法及环境管理支撑技术;(2) 恶臭分析测试技术进展及其在恶臭监测领域的应用;(3) 恶臭污染控制实用技术、成套设备及工程案例;(4) 恶臭污染的评估、应急预案与风险管理;(5) 恶臭与其他学科的交叉融合。**

**论文截稿日期:2012 年 9 月 10 日。**

**电子信箱:odorcf4@126.com。**

**会议网站:<http://www.chinaodor.com/xinwen.asp?id=185>。**