

# AP1000 核电厂氢气点火器功能分析

林 千, 周全福

(上海核工程研究设计院, 上海 200233)

**摘要:**采用集总参数分析程序对 AP1000 核电厂安全壳内氢气点火系统功能进行了分析和验证。在定义的包络事故工况下, 氢气最大瞬时释放速率达 300 kg/min。计算表明: 在无点火措施情况下, AP1000 安全壳局部隔间的氢气浓度较高, 隔间内的气体处于可燃状态, 且接近爆燃向爆炸转变 (DDT) 状态; 在实施点火措施情况下, 氢气浓度得到有效控制, 氢气点火系统能消除严重事故下氢气所引起的风险。

**关键词:** AP1000; 氢气点火器; 氢气燃烧; 爆燃向爆炸转变; 严重事故

中图分类号: TL364.4

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2012)01-0089-05

## Analysis of AP1000 Hydrogen Igniter Performance

LIN Qian, ZHOU Quan-fu

(Shanghai Nuclear Engineering Research & Design Institute, Shanghai 200233, China)

**Abstract:** A lumped parameter code was used to study the AP1000 hydrogen igniter system and demonstrate its performance. In the worst case defined in this paper, the maximum hydrogen release rate was up to 300 kg/min. The results show that, if no ignition is initiated, the hydrogen concentration in some compartment is very high, the gas is burnable and it may induce the deflagration to detonation transition (DDT). While igniters on, and the concentration is reduced below the lower flammable limits. These demonstrate that the igniter system can effectively reduce the risk of hydrogen in severe accident.

**Key words:** AP1000; hydrogen igniter; hydrogen combustion; deflagration to detonation transition; severe accident

在核电厂发生严重事故情况下, 锆包壳与水或水蒸气发生化学反应产生大量氢气, 可能在安全壳内引起氢气爆燃或爆炸, 形成较大的压力载荷, 对安全壳的完整性构成极大威胁。为避免大面积或局部氢气爆燃和爆炸, 预防和降低氢气所引起的风险, 目前在大型干式安全壳内通常安装非能动氢气复合器或氢气点火器

来控制严重事故情况下的氢气浓度<sup>[1]</sup>。

由于在严重事故情况下, 安全壳内不可避免地存在随机点火源, 如电火花、裸露电缆、高温气体等, 都可能引起氢气的自燃或爆炸, 与其如此, 不如在氢气浓度仍处于安全范围之内时, 实施主动的氢气点火, 使氢气缓慢燃烧, 从而减少安全壳内的氢气总量, 并将氢气浓度保持在可燃限值

以下,避免更严重的氢气爆炸发生。因此,采用氢气点火器来降低和限制安全壳内的氢气浓度,被认为是一种非常有效的氢气控制措施<sup>[2]</sup>。

我国引进的 AP1000 核电机组采用氢气点火器来控制严重事故下安全壳内的氢气浓度<sup>[3]</sup>。本文采用集总参数程序 MAAP4 拟对 AP1000 核电厂的氢气控制系统进行分析,定义一包络工况事故序列,来验证 AP1000 核电厂氢气点火器的功能,并进一步研究点火器启动时间对事故后果的影响。

## 1 程序与模型简介

MAAP4 程序<sup>[4]</sup>是由美国电力研究所(EPRI)委托 Fauske 公司开发的严重事故分析程序,并通过了美国核管会(NRC)的审查,作为美国核电厂严重事故管理的主要评价和分析工具,在美国及世界其他国家的核工业界都有广泛应用。

在 AP1000 核电厂安全壳内共布置了 64 个火花塞式氢气点火器,分别布置于安全壳上部隔间、蒸汽发生器(SG)隔间、堆芯补水箱(CMT)隔间、内置换料水箱(IRWST)隔间、堆芯冷却系统(PXS)隔间等的不同标高位置。AP1000 核电厂的双层安全壳及内部空间的节点划分如图 1 所示,在钢安全壳内有 9 个节点,另有 3 个节点描

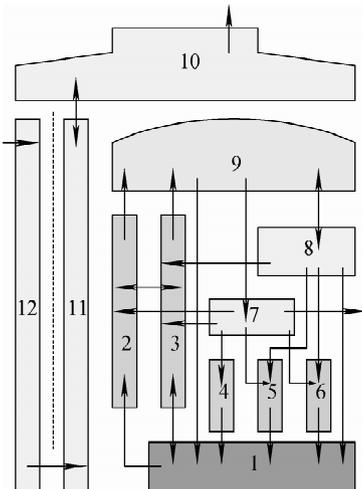


图 1 AP1000 核电厂安全壳节点划分

Fig. 1 AP1000 containment nodalization

- 1—堆腔;2—1# SG 隔间;3—2# SG 及环形通道隔间;  
4—化容系统隔间;5—PXS-A 隔间;6—PXS-B 隔间;  
7—CMT 隔间;8—IRWST 隔间;9—安全壳上部隔间;  
10—PCS 穹顶;11—PCS 环形通道;12—PCS 下降段

述非能动安全壳冷却系统(PCS)。

## 2 计算结果与讨论

### 2.1 事故序列定义和氢气源项分析

为验证氢气点火器的功能,本文设计一能在短时间内产生大量氢气的事故序列,定义为发生在蒸汽发生器隔间内的冷管段双端断裂大破口事故,并叠加安注箱全部失效,仅 1 列 CMT 和 IRWST 注水有效。该事故序列主要事故进程列于表 1。

表 1 主要事故进程

Table 1 Main accident progress

时间/s	事件
0.0	1# SG 隔间冷管段双端断裂大破口
0.2	反应堆紧急停堆
0.7	CMT 启动,PCS 启动
~15	堆芯活性区开始裸露
~20	堆芯活性区完全裸露
~100	包壳最高温度持续高于 1 300 K, 开始大量产生氢气
~200	压力容器内氢气总产量达 100 kg
~300	压力容器内氢气总产量达 500 kg
~400	压力容器内氢气总产量达 670 kg
10 000	压力容器内氢气总产量达 810 kg

在发生大破口之后,喷放引起堆芯水位急剧下降,在约 20 s 时堆芯已完全裸露(图 2)。由于 CMT 的注水量不足以冷却堆芯,在这个阶段堆芯很快过热,锆包壳温度升高,并开始发生氧化产生氢气。锆氧化过程是放热反应,产生的热量使堆芯温度持续升高。堆芯温度升高和氢气的产生相互促进,使得该过程不断加速和扩大,从而产生更多氢气(图 3)。在这个过程中,CMT 的注水不仅未冷却堆芯,反而由于

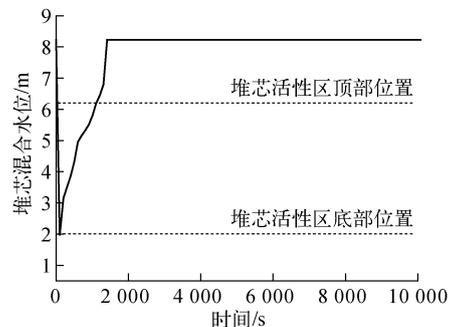


图 2 堆芯混合水位

Fig. 2 Core mixture level

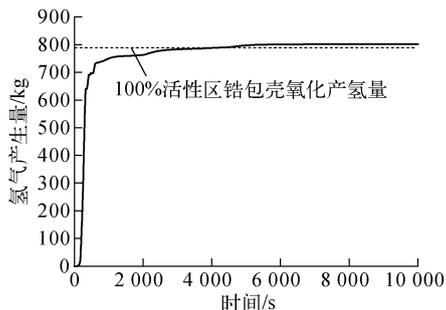


图3 压力容器内氢气产生量

Fig. 3 Hydrogen generated in vessel

水蒸气的存在为氧化反应提供了充足的氧化剂,因而在事故后约 400 s 内产生了 670 kg 氢气,事故后 10 000 s 压力容器内氢气总产量达 810 kg,超过 100%活性区锆包壳(约占堆芯包壳总量 79%)的氧化反应产氢量(788 kg)。在这个过程中,氢气向安全壳隔间内的最大瞬时释放速率达 300 kg/min,而在典型工况中的氢气瞬时释放速率约 100 kg/min,因此,以该事故序列作为包络工况来验证氢气点火器的功能。

## 2.2 无点火措施的计算结果

压力容器内氢气的大量产生是在事故初期 1 000 s 内,大部分氢气通过破口直接释放到蒸汽发生器隔间,因此,1<sup>#</sup>蒸汽发生器隔间内的氢气体积浓度短时间内上升到 25%(图 4a)。但由于大量蒸汽也是通过该破口释放,因此,1<sup>#</sup>蒸汽发生器隔间内的蒸汽浓度也非常高(图 4b)。随后,安全壳内的空气流动混合,使得水蒸气和氢气从 1<sup>#</sup>蒸汽发生器隔间向其他隔间扩散,引起 2<sup>#</sup>蒸汽发生器隔间、CMT 隔间、堆腔、安全壳上部隔间的氢气浓度和蒸汽浓度也升高。后来,随着水蒸气的凝结,这些隔间内的水蒸气浓度降低,而氢气浓度继续升高到 10% 以上。当开启 ADS 进行卸压后,水蒸气和氢气通过卸压管线进入 IRWST 内,由于大部分水蒸气被冷凝,使得 IRWST 内的氢气浓度迅速升高,并高于其他隔间。

由于水蒸气对于氢气的燃烧具有惰化效果,当水蒸气浓度较高时,氢气浓度即使高于燃烧限值也不会发生燃烧。随着安全壳内的气体混合,在某些隔间内的气体变为可燃。根据隔间内氢气、水蒸气和空气的相对体积份额,可通过 Shapiro 氢气风险三角图来判定混合气体处

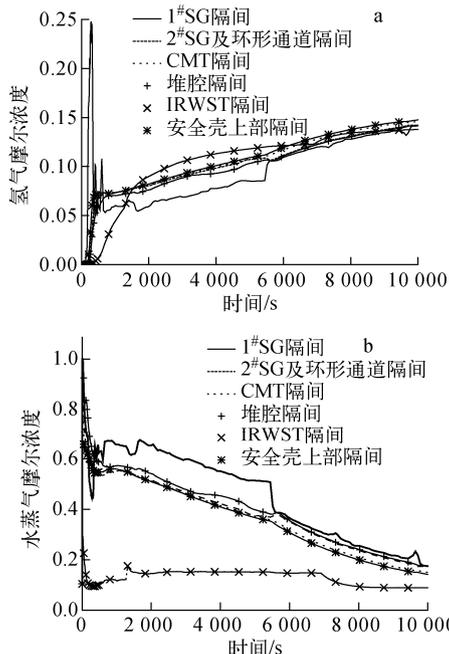


图4 无点火措施主要隔间的氢气和水蒸气浓度

Fig. 4 Main compartments hydrogen and steam concentration without ignition

于爆炸、爆燃向爆炸转变(DDT)、燃烧或不可燃状态。分析发现,1<sup>#</sup>蒸汽发生器隔间、IRWST隔间的氢气风险最严重(图 5),这两个隔间的气体成分处于燃烧区域,甚至接近爆燃向爆炸转变区域。

## 2.3 有点火措施的计算结果

在电厂应急响应规程中,当堆芯出口温度超过 922 K,操纵员手动开启氢气点火系统。如氢气点火系统处于运行状态,一旦氢气浓度达到向上传播限值,氢气将发生燃烧,即实施主动点火。图 6 为实施点火措施后 1<sup>#</sup>蒸汽发生器隔间、IRWST 隔间的氢气风险图,由图可见,在实施点火措施情况下,气体成分始终保持在可燃区域外。

由于大面积的氢气燃烧将引起安全壳内的温度和压力上升,需防止安全壳超压失效。图 7 为安全壳的压力曲线,在喷放初期,由于大量水蒸气释放到安全壳,安全壳内绝对压力达 0.4 MPa。而后,随着蒸汽冷凝,安全壳内的压力逐渐降低。尽管氢气在燃烧过程中将引起安全壳压力的升高,但安全壳压力始终低于设计压力(约 0.5 MPa)。在这个过程中安全壳内的气体温度如图 8 所示,不会对安全壳构成威胁。

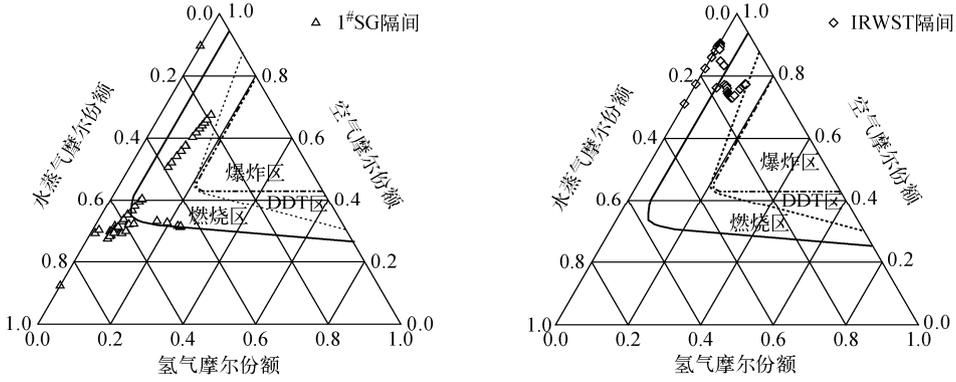
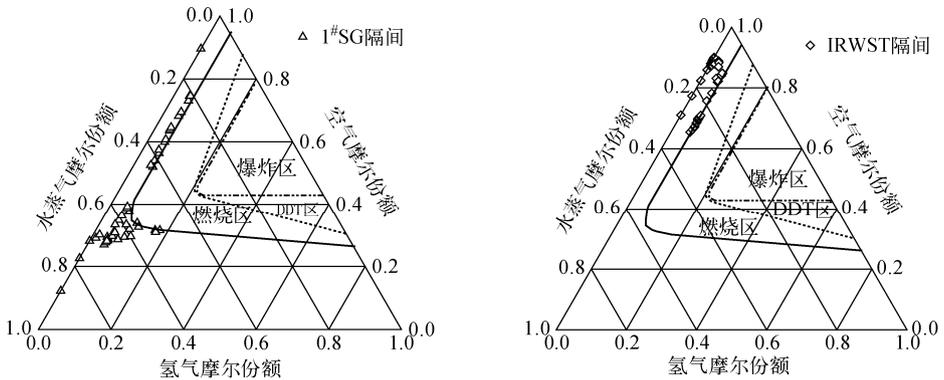
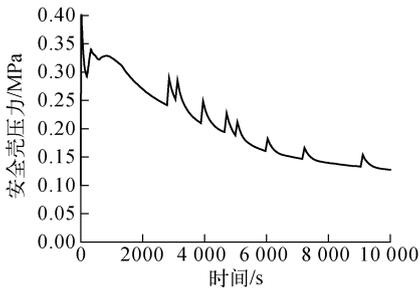
图5 无点火措施 1<sup>#</sup> SG 隔间和 IRWST 隔间的氢气风险图Fig. 5 1<sup>#</sup> SG compartment and IRWST compartment hydrogen risk without ignition图6 有点火措施 1<sup>#</sup> SG 隔间和 IRWST 隔间的氢气风险图Fig. 6 1<sup>#</sup> SG compartment and IRWST compartment hydrogen risk with ignition

图7 有点火措施安全壳内的压力

Fig. 7 Containment pressure with ignition

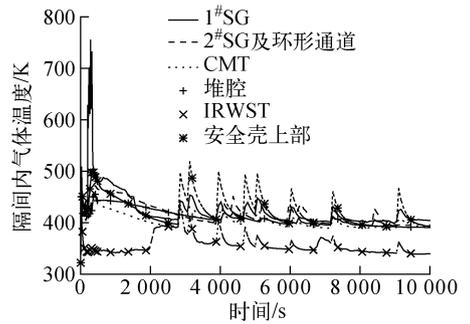


图8 有点火措施安全壳主要隔间的气体温度

Fig. 8 Main compartments gas temperature with ignition

## 2.4 点火时间敏感性分析

在实际事故进程中,可能由于操纵员动作延误或点火器失效,导致在事故初期点火系统未能启动,而在事故发生后某个时刻才恢复运行。因此,进一步研究点火系统响应时间对点火效果的影响,该分析中不考虑随机点火源引起的氢气自燃,结果示于图9。从图9可知,若在事故初期并未实施点火,而在事故发生后

2 000、4 000、6 000 或 8 000 s 时再实施点火,安全壳内的压力峰值将明显增大,但仍低于事故初期水蒸气喷放阶段的压力。这是由于经过一定时间的混合和积累,安全壳内达到可燃浓度的氢气量增大,一旦实施点火,短时间内的氢气燃烧总量增加,引起安全壳压力升高。在这

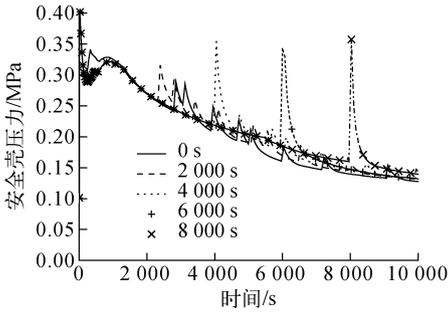


图9 不同点火时间安全壳内的压力

Fig.9 Containment pressures at different ignition time

个过程中隔间气体温度上升也较高,图 10 为 1# 蒸汽发生器隔间、安全壳上部隔间、CMT 隔间氢气燃烧引起的隔间气体温度变化,隔间气体温度峰值达到 900 K。由此可见,点火时间是一敏感参数,事故中、后期进行点火可能会对安全壳带来较大的温度和压力载荷。尽管在本文的敏感性计算中,安全壳的压力仍低于设计压力,短时较高的气体温度也不会对安全壳的完整性和稳定性构成威胁,但仍需关注延迟点火可能带来的不利因素。

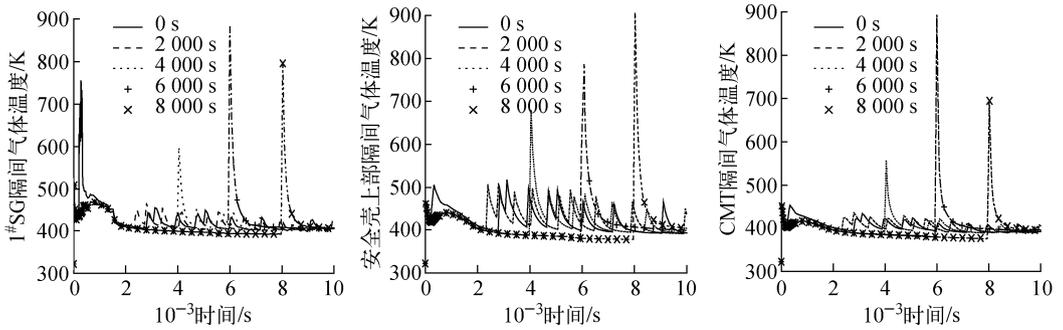


图 10 不同点火时间隔间的气体温度

Fig.10 Compartment gas temperatures at different ignition time

### 3 结论

1) 定义了一冷管段双端断裂大破口、叠加安注箱失效和仅 1 列 CMT 和 IRWST 有效的事故序列,在该事故情况下,氢气通过破口的最大瞬时释放速率达 300 kg/min,远大于典型工况中 100 kg/min 的氢气释放速率,可作为包络工况来验证 AP1000 核电厂氢气点火器的功能。

2) 计算表明,在本事事故序列中,无点火措施情况下,安全壳主要隔间内的气体成分达到燃烧状态,并可能接近爆燃向爆炸转变状态;有点火措施情况下,安全壳内的气体浓度始终处于燃烧限值下,AP1000 核电厂氢气点火系统能消除严重事故情况下的氢气所引起的风险。

3) 点火器的启动时间是一敏感参数,事故中、后期进行点火可能会对安全壳带来较大的温度和压力载荷。

### 参考文献:

[1] 邓坚,曹学武. 秦山二期核电厂严重事故下安全

壳内氢气浓度分布及风险初步分析[J]. 核动力工程,2008,29(2):78-84.

DENG Jian, CAO Xuewu. Preliminary study of hydrogen distribution and risk under severe accident condition for Qinshan NPP Unit2 containment[J]. Nuclear Power Engineering, 2008, 29 (2):78-84(in Chinese).

[2] 肖建军,周志伟,经荣清. 基于火焰加速和燃爆转变准则的氢气点火安全性研究[J]. 原子能科学技术,2006,40(5):563-569.

XIAO Jianjun, ZHOU Zhiwei, JING Xingqing. Study on hydrogen ignition safety based on flame acceleration and deflagration to detonation transition criteria [J]. Atomic Energy Science and Technology, 2006, 40(5): 563-569(in Chinese).

[3] AP1000 design control document, Rev. 16[M]. USA: Westinghouse Electric Company, 2007.

[4] MAAP4.0 user's manual, Rev.0.15 [M]. USA: EPRI, 1994.