

文章编号：0258-0926(2016)S2-0125-04；doi: 10.13832/j.jnpe.2016.S2.0125

# 严重事故条件下水蒸气对氢气 燃烧影响试验研究

王 迎, 李 勇, 咎元锋, 唐月明, 郑 华,  
谢士杰, 张 震, 张友佳

中国核动力研究设计院中核核反应堆热工水力技术重点实验室, 成都, 610213

**摘要**：通过试验分析严重事故条件下水蒸气对氢气燃烧行为的影响，分别改变初始水蒸气浓度，比较分析氢气燃烧的温度、压力、火焰传播速度和燃尽率，并且对试验结果进行对比分析，可得出以下结论：水蒸气降低了氢气燃烧峰值温度、峰值压力和火焰传播速度，并且水蒸气浓度越高，对氢气燃烧影响越大，但是对氢气燃尽率无影响。

**关键词**：氢气燃烧；水蒸气；峰值温度；峰值压力；火焰速度；燃尽率

**中图分类号**：TL339 **文献标志码**：A

## Experimental Analysis of Steam Effect on Hydrogen Combustion in Severe Accidents

Wang Ying, Li Yong, Zan Yuanfeng, Tang Yueming, Zheng Hua, Xie Shijie,  
Zhang Zhen, Zhang Youjia

CNNC Key Laboratory on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics Technology, Nuclear Power Institute of China. Chengdu, 610213, China

**Abstract**: This paper investigates the effect of steam concentration on hydrogen combustion in severe accident condition. By changing the initial concentration of steam, combustion temperature, peak pressure, flame velocity and burn-off rate are compared, and experimental results also are compared. These results are concluded that the steam can decrease the combustion temperature, pressure and flame velocity, but has no effect on the burn-off rate.

**Key words**: Hydrogen combustion, Steam, Peak temperature, Peak pressure, Flame velocity, Burn-off rate

### 0 前 言

压水堆核电厂严重事故中，冷却剂丧失将导致堆芯裸露，堆芯内高温的锆合金燃料包壳将与水或者水蒸气发生剧烈的放热化学反应，释放出大量的氢气以及热量，这些氢气将通过一回路压力边界破口释放至安全壳内<sup>[1-2]</sup>。事故后期压力容器下封头失效后，堆芯熔融物与混凝土的反应以及堆腔内的水辐射分解也会产生大量的氢气<sup>[3-4]</sup>。为了避免严重事故下安全壳内氢气的积聚，有效

地控制氢气浓度，避免氢气发生爆炸行为，从而保证安全壳的完整性，有必要对核电厂在多重极端事故叠加时安全壳内氢气的产生、分布、燃烧以及氢气控制技术进行研究，进一步加强对氢气风险的控制，防止氢气爆炸以及放射性物质的泄漏和扩散。

氢气、空气和水蒸气的混合物燃烧模式有扩散火焰、慢的或加速的爆燃以及爆炸，氢气的燃烧模式由氢气浓度、初始条件以及边界条件决定，

收稿日期：2016-10-09；修回日期：2016-12-28

基金项目：四川省科技计划项目（2014ZZ0034）

作者简介：王 迎（1982—），男，助理研究员，现主要从事反应堆热工水力研究工作

其中初始水蒸气浓度对氢气燃烧模式有重要的影响。水蒸气一方面起到惰性气体作用,抑制氢气燃烧,另一方面水蒸气流动加速氢气混合,一旦水蒸气局部冷凝,氢气浓度局部升高,会促进氢气燃烧加剧,从而可能发生爆燃或爆炸。因此,有必要通过试验分析水蒸气对氢气燃烧行为的影响,研究不同水蒸气浓度条件下氢气燃烧的压力、温度以及火焰传播速度等。

## 1 试验装置和方法

### 1.1 试验装置

试验在中国核动力研究设计院氢气行为研究试验装置(MHBF)开展。氢气火焰传播速度通过快速响应热电偶间接测量,罐体空间由上至下共布置6支快速响应热电偶,分别记为a、b、c、d、e、f,氢气燃烧压力采用压力传感器测量。

### 1.2 试验参数

主要考察初始水蒸气浓度对氢气燃烧过程的影响,试验中初始压力均为0.1 MPa,初始温度均为120,通过改变初始水蒸气浓度,比较分析氢气燃烧过程的温度、压力、氢气火焰传播速度和氢气燃尽率,具体工况参数设置如表1所示。

表1 试验参数

Table 1 Experimental Parameters

初始压力/MPa	0.1
初始温度/	120
初始氢气浓度/%	10
初始水蒸气浓度/%	0~35

### 1.3 试验方法

试验过程中氢气燃烧的峰值温度和压力分别由快速响应热电偶和绝对压力传感器测量的具体数值获得。

为得到氢气燃烧火焰传播速度 $u$ ,需要对燃烧过程中位于不同位置的快速响应热电偶测量得到的温度数据进行处理。因为已燃气体与未燃气体的温度相差较大,可认为热电偶温度的突然升高标志着火焰到达该热电偶所在位置。对不同位置的热电偶,以点火后火焰到达热电偶处所经历的时间 $t$ 为横坐标,以热电偶所在的轴线方向为纵坐标作图,根据图中试验数据点分布进行分析,然后进行线性拟合,可得到火焰传播速度 $u$ 。

氢气燃尽率用下式计算:

$$R_{H_2} = \frac{W}{C_{H_2,0}} = \frac{C_{H_2,1} - C_{H_2,1} \cdot C_{H_2O,0} - C_{H_2,0}}{\left(\frac{3}{2}C_{H_2,1} - 1\right) \cdot C_{H_2,0}} \quad (1)$$

式中, $C_{H_2,0}$ 、 $C_{H_2,1}$ 为燃烧前后氢气浓度,%; $W$ 为消耗的氢气量占燃烧前混合气体的浓度,%; $C_{H_2O,0}$ 为燃烧前水蒸气浓度,%。

## 2 试验结果及分析

为分析水蒸气对氢气燃烧过程的影响,试验对比分析了5种不同水蒸气浓度对氢气燃烧温度、压力、火焰传播速度以及氢气燃尽率的影响。

### 2.1 对燃烧温度的影响

图1、图2给出了水蒸气对氢气燃烧温度的影响,图1为选取的e、c、a3个测点的温度变化,从图中可发现火焰前锋到达这3个测点的时间差值非常小,三点温度突变时间几乎相同,说明10%的氢气浓度条件下火焰传播速度非常迅速,其次e、c、a3个测点温度最大值依次减小,由于采用底部点火,火焰前锋是由点e逐渐传播至点a,燃烧时间越长,散热损失越大,因此造成着火点远端温度越低。图2为在不同水蒸气浓度下最高温度值变化曲线,由此图可看出水蒸气对氢气燃烧温度影响很大,但是这种影响又并非是线性变化。5%水蒸气浓度时,近端测点最高温度明显减小,而远端温度变化不明显,说明5%水蒸气浓度对氢气燃烧有抑制作用,当水蒸气浓度提升至15%,氢气燃烧最高温度与5%水蒸气浓度相比有升高,说明随着水蒸气浓度提升,水蒸气对氢气燃烧温度的影响在减弱,从图中还可看出,当水蒸气浓度为25%、35%时,与15%水蒸气浓度相比,水蒸气对氢气燃烧影响加强,说明高水蒸气

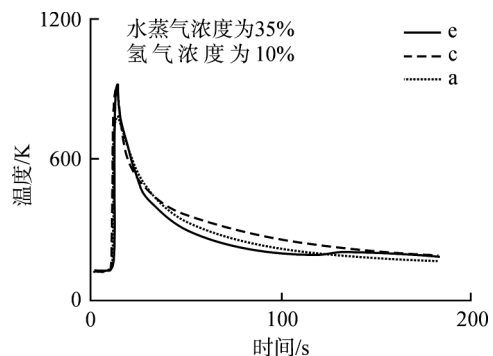


图1 不同坐标点温度曲线

Fig. 1 Temperature Graph in Different Point

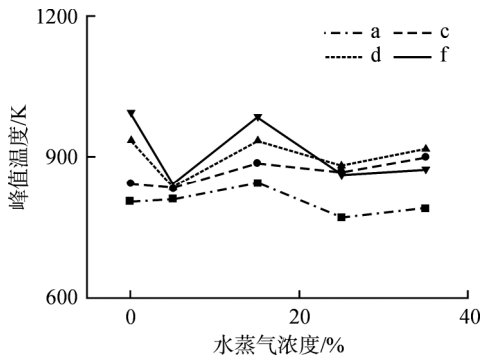


图 2 水蒸气对氢气燃烧温度的影响

Fig. 2 Effect of Steam on Combustion Temperature

浓度明显降低氢气燃烧温度。

### 2.2 对燃烧压力的影响

图 3 为不同水蒸气浓度下氢气燃烧压力曲线。由图 3 可看出 10% 的氢气浓度条件下，燃烧压力增量大致在 2 倍左右，而水蒸气对压力波的传播没有影响。图 4 为水蒸气浓度对氢气燃烧峰值压力的影响，由图可知，与温度的变化趋势相似，5% 的水蒸气浓度降低了氢气燃烧峰值压力，而提升到 15% 时水蒸气的影响减弱，当浓度提升

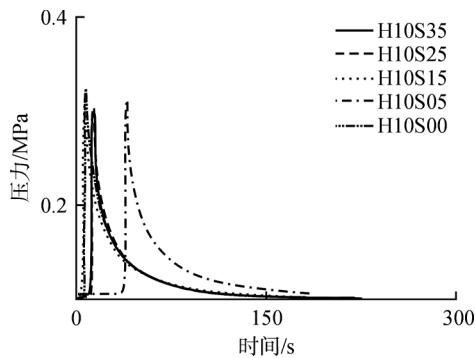


图 3 水蒸气对燃烧压力影响

Fig. 3 Effect of Steam on Combustion Pressure  
H10S35 表示水蒸气浓度为 35%，氢气浓度为 10%，其余类推

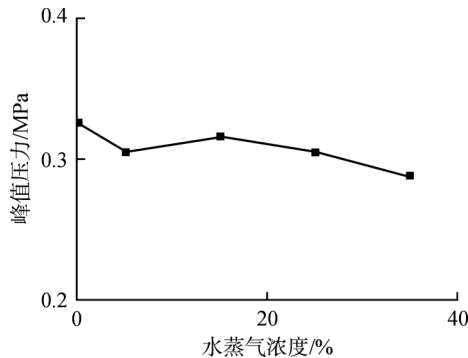


图 4 水蒸气对燃烧峰值压力影响

Fig. 4 Effect of Steam on Combustion Peak Pressure

至 25% 以上，则水蒸气对氢气燃烧压力影响加深。以上分析表明，水蒸气对氢气燃烧总体是起到抑制燃烧作用，但这种抑制燃烧作用与水蒸气浓度有关，低浓度下抑制燃烧作用强，15% 浓度时抑制燃烧作用减弱，超过 25% 浓度值则抑制作用进一步增强，这种抑制燃烧作用呈现出加强-减弱-加强的变化趋势。

### 2.3 对火焰传播速度的影响

图 5 是不同水蒸气浓度下氢气火焰锋面随时间的变化曲线，由此曲线可发现氢气火焰传播在接近罐体顶部出现明显的减速现象，由于试验点火位置在罐体底部，因此在接近顶部时氢气基本燃烧完毕，放热量减少，因此火焰传播速度也明显降低。其次，水蒸气浓度越高，对氢气火焰传播影响越明显。图中可看出，5% 的水蒸气浓度下氢气燃烧与不添加水蒸气工况相比，氢气火焰传播无明显变化，在接近罐体顶部区域，5% 的水蒸气浓度下氢气燃烧还要快于不添加水蒸气的燃烧工况。当水蒸气浓度提高到 15% ~ 35% 区间，从图中可看出火焰传播全过程都有很明显的减速，且水蒸气浓度越高，火焰传播速度减速越明显。图 6 为根据试验结果拟合得出的不同水蒸气浓度下氢气火焰传播速度，该图更直观地显示出水蒸气对火焰传播速度的抑制作用。以上试验结果表明，水蒸气对氢气燃烧有很好的抑制作用，水蒸气的存在，减缓了氢气火焰的传播速度，降低燃烧峰值压力和温度，减轻了严重事故发生时氢气燃烧对安全壳壁面的压力和温度负荷，可有效避免氢气燃烧模式由缓慢燃烧向爆炸的转变。

### 2.4 对燃尽率的影响

图 7 给出了初始水蒸气浓度对氢气燃尽率的影响

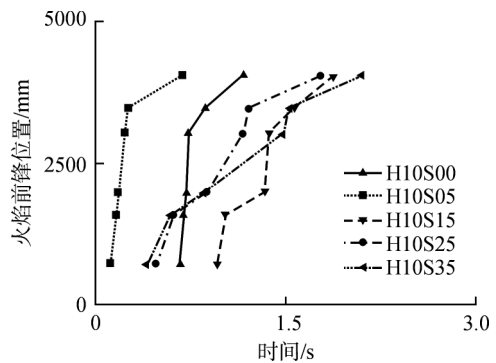


图 5 水蒸气对火焰前峰位置影响

Fig. 5 Effect of Steam on Flame Position

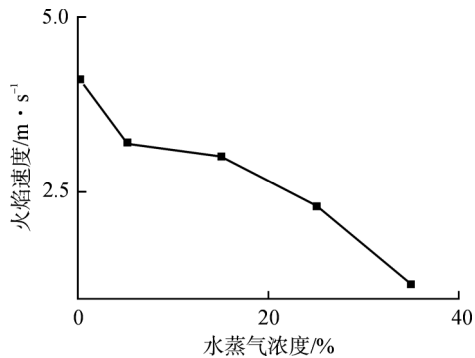


图6 水蒸气对火焰速度影响

Fig. 6 Effect of Steam on Combustion Flame Speed

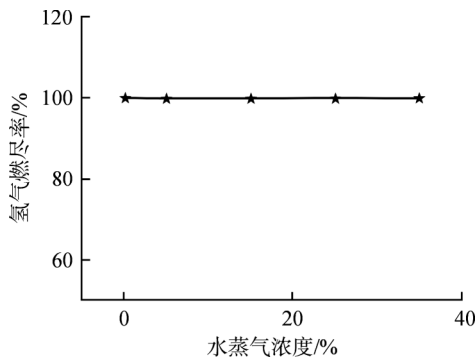


图7 水蒸气对氢气燃尽率影响

Fig. 7 Effect of Steam on Hydrogen Deplete Rate

影响。由图可明显发现,氢气的燃尽率均为100%,这说明在0%~35%的范围内,水蒸气浓度对燃尽率没有影响,氢气均能完全燃烧。

### 3 结论

本文通过试验研究初始水蒸气浓度对氢气燃烧行为的影响,通过改变初始水蒸气浓度,比较分析氢气燃烧温度、压力、火焰传播速度和燃尽率,可得出以下结论:

(1) 水蒸气降低了氢气燃烧峰值温度和峰值压力,水蒸气浓度越高,对氢气燃烧影响越明显。

(2) 水蒸气浓度提高,火焰传播速度降低,说明水蒸气的存在,对氢气燃烧火焰的传播有很明显的阻滞作用。

(3) 水蒸气浓度对氢气燃烧燃尽率没有影响。

参考文献:

- [1] 邓坚. 大型干式安全壳严重事故条件下氢气控制研究[D]. 上海:上海交通大学学位论文, 2008.
- [2] 郭丁情, 邓坚, 曹学武, 等. 严重事故下氢气风险及氢气控制系统的初步分析[J]. 原子能科学技术, 2008, 42(12): 1109-1114.
- [3] Farmer M T, Sienicki J J, Kovtonyuk A. OECD MCCI analytical support (Stand alone task): Water ingestion modeling of the OECD/MCCI SSWICS tests [R]. NRC/MCCI/2003-tr01, october 15, 2003.
- [4] Lomperski S, Farmer M T, Kilsdonk D J, et al. Project small-scale water ingestion and crust strength tests (SSWICS) SSWICS final report: crust strength measurements[R]. OECD/ MCCI-2005-TR02, June, 2005.

(责任编辑:张祚豪)