

文章编号：0258-0926(2017)02-0060-04；doi:10.13832/j.jnpe.2017.02.0060

# 核电厂非能动氢气复合器消氢特性试验研究

王宏庆, 李志明, 李 勇, 马韦刚, 姜 峨, 王 春, 傅晟伟

中国核动力研究设计院, 成都, 610213

**摘要：**根据非能动氢气复合器 (PAR) 的工作状态特点和启动阈值、停止阈值、消氢能力、点火阈值等关键特性参数的要求, 设计建立能够模拟安全壳内事故环境条件、在非能动条件下开展 PAR 关键特性参数验证试验的试验装置, 制定相应的试验方法, 开展启动阈值试验、启动时间试验、消氢能力试验和点火阈值试验等, 获得 PAR 的关键特性参数。试验结果表明: PAR 关键特性在不同的试验参数条件下测试结果也不同; 在制定 PAR 消氢特性参数要求时需要限定试验方法和试验参数条件, 以便获得统一的、定量的 PAR 的消氢特性参数。

**关键词：**非能动氢气复合器; 消氢特性; 严重事故

**中图分类号：**TL364 **文献标志码：**A

## Test Research of Hydrogen Removal Characteristics of Passive Autocatalytic Hydrogen Recombiner in NPPs

Wang Hongqing, Li Zhiming, Li Yong, Ma Weigang, Jiang E, Wang Chun, Fu Shengwei

Nuclear Power Institute of China, Chengdu, 610213, China

**Abstract:** Passive autocatalytic hydrogen recombiners (PAR) are extensively used in the GRE-II, GRE-II+, and GRE-III NPPs. Based on the requirements for key parameters of PAR, such as working features, start and stop threshold, hydrogen removal ability and ignition threshold, the experiment apparatus is designed and constructed which can simulate the NPS severe accident condition and verify the PAR key characteristic parameters under passive condition. Test method is established, and series experiments on the start and stop threshold, starting time, hydrogen removal ability and ignition threshold were carried out. The test results show that different test conditions will lead to differences in PAR parameters, for that reason, only limited methods and conditions are suggested to use to get the unified, measurably quantified PAR key parameters.

**Key words:** Passive autocatalytic hydrogen recombiners, Hydrogen removal characteristics, Severe accident

## 0 引 言

即使出现全厂断电的超设计基准事故工况, 非能动氢气复合器 (PAR) 仍能正常运行消氢, 符合三代核电厂的非能动核安全理念, 是目前主流的严重事故工况下消氢技术。

PAR 具有无需外部能源、能够在常温低浓度氢气条件下快速启动、无运动部件、非能动地持续消氢、能在大于 50% 水蒸气条件下消除氢气等

优点, 是世界各国核安全局普遍采用的核电厂严重事故消氢设备, 也是国际原子能机构提出的“纵深防御”核安全理念中第 4 道防御的必要组成<sup>[1]</sup>。但是, PAR 也存在下述问题: 催化剂在严重事故工况可能会使人中毒并影响消氢效果, 需对中毒后的 PAR 消氢性能进行评估, 在氢气产生率较大的工况下使用 PAR 不能有效降低氢气浓度峰值, 氢氧的复合反应释热可能会引发氢气

爆燃的风险等。

各类型 PAR 的消氢特性需通过模拟试验进行验证。但是,各型号 PAR 的消氢特性参数存在较大差异,国内外没有统一的针对 PAR 的消氢特性试验规范和标准,因此无法对 PAR 消氢特性进行统一的评价,使得消氢系统的设计方在引用 PAR 消氢特性数据进行安全分析时缺乏可靠依据。

## 1 研究现状

PAR 的状态可分为备用、工作 2 种状态。PAR 的状态和出风口与入风口温度差值 ( $\Delta T$ ) 的关系见图 1。从备用状态转变为工作状态时需经历启动,从工作状态转变为备用状态为停止。

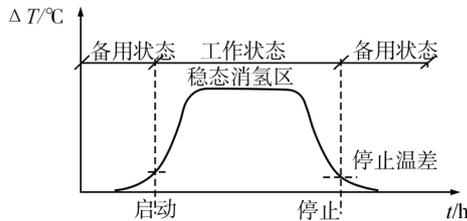


图 1 PAR 的状态与  $\Delta T$  关系图

Fig 1 Relationship of PAR Status and  $\Delta T$

PAR 关键工作特性参数主要为启动时间、启动阈值、点火阈值和消氢能力等。启动时间为 PAR 从备用状态转变为启动状态之间的时间。启动阈值为 PAR 在非能动自然循环条件下启动所需的最低氢气浓度值。点火阈值为 PAR 在工作状态时引起氢气燃烧或者燃爆时的氢气浓度值。消氢能力为 PAR 在非能动自然循环条件下单位时间的消氢量。

国内核电厂一般参考阿海珐 (AREVA) PAR 提出的消氢性能指标。启动阈值  $<2\%$ 、停止阈值  $<0.5\%$ ；在  $0.15 \text{ MPa (abs)}$  和空气中  $4\% \text{ H}_2$  含量的标准状态下,FR90/1-1500 和 FR90/1-750T 非能动氢复合器的消氢能力分别为  $5.36$ 、 $2.4 \text{ kg/h}^{[2]}$ 。目前,国内外消氢系统设计方在对 PAR 提出技术要求时未对启动阈值、启动时间、点火器阈值等提出明确的验证方法。而各种 PAR 的结构和性能上有所差异,国内外没有测试 PAR 消氢特性参数的标准方法,各个 PAR 供应商都是自行设计试验方法测定各自产品的消氢性能。

## 2 试验装置

PAR 性能试验装置见图 2,试验对象为 PAR 样机。反应容器是承压反应容器,为性能试验提供环境压力边界;配气系统由压缩空气、氢气供应系统、氧气供应系统、水蒸气供应系统等组成。

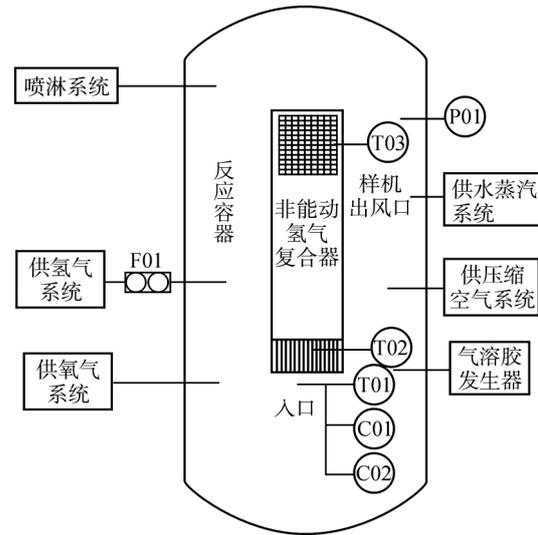


图 2 PAR 性能试验装置图

Fig. 2 Schematic Diagram of PAR Performance Test

图 2 中,F01 为氢气流量计的测量参数;P01 为反应容器内部压力测量装置的测量参数;C01、C02 和 T01 为样机入口氢气浓度、氧气浓度和温度测量装置的测量参数;T02 为样机催化部件温度测量装置的测量参数;T03 为样机通风口温度测量装置的测量参数。

## 3 消氢特性试验

非能动氢气复合器主要由催化部件及壳体组成。催化部件上含有催化剂,氢气和氧气在催化部件上发生化学反应从而消除氢气。壳体为催化板安装提供载体,并为非能动消氢提供烟囱效应。在壳体结构参数一致的情况下(催化板间距、壳体高度等参数),催化板数量越多,试验效果越好。选择小尺寸的样机试验具有保守性。

PAR 样机安装 15 块  $300 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$  催化板,与工程产品的缩小比例为  $1:5$ ,壳体高度和催化板间距与工程产品一致。

### 3.1 启动时间试验

启动时间试验中,要求催化部件必须为 1 个

月时间内没有经过高温（大于 100℃）和消氢工作。原因在于催化部件在经历高温或者消氢工作后具备很高的活性，其启动时间很短，采用此催化部件进行试验不能代表实际备用状态下非能动氢气复合器的启动性能。

将 30 d 内未经历高温和消氢实验的催化板装入样机，在 2%、3%、4% 氢浓度、压力为 40~60 kPa，温度为 5~50℃ 参数条件下分别进行启动时间试验；当反应容器内氢气浓度达到试验值后停止供氢。

反应容器内氢浓度、出口温度与时间的曲线见图 3。

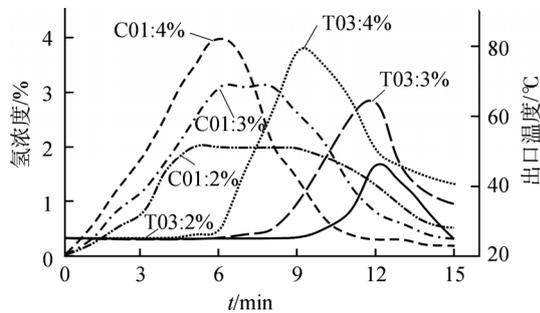


图 3 启动时间试验曲线

Fig. 3 Test Curves of PAR Start Time

当 PAR 出风温度口 T03 快速上升时，PAR 启动，反应容器内氢气浓度开始下降。

从图 3 可以看出，当 PAR 出口温度 T03 上升速率大于 5℃/min 时，PAR 消氢能力加快，反应容器内的氢浓度下降速度加快，可将 T03 上升速率大于 5℃/min 的点作为 PAR 是否启动的判定点，氢浓度越高，PAR 启动时间越短。

### 3.2 启动阈值试验

在 2% 以下的氢浓度、压力为 40~60 kPa、温度为 5~50℃ 非能动条件下进行启动阈值试验。当反应容器内氢气浓度达到试验参数后停止供氢。试验连续进行 2 次，第 2 次试验在第 1 次试验结束 10 min 后进行（图 4）。

图 4 表明，PAR 具备在小于 2% 氢浓度条件下启动的能力。PAR 在首次试验时启动阈值为 1.8%，再次试验时启动阈值为 1.2%，均小于 2%，PAR 在启动-停止后再次消氢时，启动阈值会降低，且启动时间缩短。

### 3.3 消氢能力试验

根据 Fineschi 等<sup>[3]</sup>的研究，在一定范围

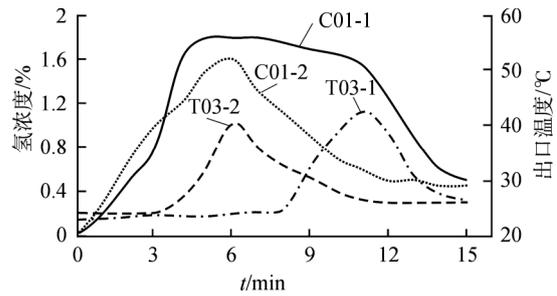


图 4 启动阈值试验曲线

Fig. 4 Test Curves of PAR Start Shreshold

内，PAR 入口氢气的质量流量决定了其消氢速率，而入口氢气的质量流量由压力、氢气的体积浓度和入口气体流速决定。

在 4% 的氢浓度、压力为 40~60 kPa、入口温度为 5~50℃，非能动条件下进行 PAR 消氢能力试验。消氢能力试验中的压力、温度、氢浓度和氢气流量曲线见图 5。

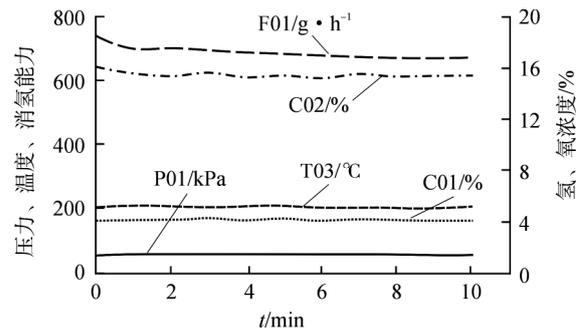


图 5 消氢能力试验曲线

Fig. 5 H<sub>2</sub> Depletion Rate Curves of the PAR

试验过程中持续通入氢气，当 PAR 达到稳定消氢状态后，PAR 进出口温度差、氢气浓度和压力达到平衡状态。持续通入的氢气流量即为此稳定状态（温度、压力、氢浓度）PAR 的消氢能力。试验过程中反应容器内氧气持续消耗和产生大量的热量，需补充氧气和采取降温措施。

图 5 表明，在 4% H<sub>2</sub>、40~60 kPa 条件下，PAR 样机消氢能力达到 610 g/h。通过此试验方法，可获得不同温度、氢气浓度、压力条件下 PAR 的消氢能力。

### 3.4 点火阈值试验

点火阈值试验的初始压力为 40~60 kPa，温度为 5~50℃，试验在无水蒸气条件下和 20%~30% 水蒸气条件下进行。

点火阈值试验中反应容器内氢气浓度与压力

随时间变化曲线见图 6。

图 6 表明，在无水蒸气条件下，氢浓度到 7.5% 后发生了点火行为，容器内的压力突升，氢浓度瞬间下降到 0.3% 以下；在含有 30% 水蒸气的环境下，氢气浓度达到 10.5% 时 PAR 能够催化消氢，氢气浓度缓慢下降，未发生氢气点火行为，可见水蒸气能够提高 PAR 的点火阈值。

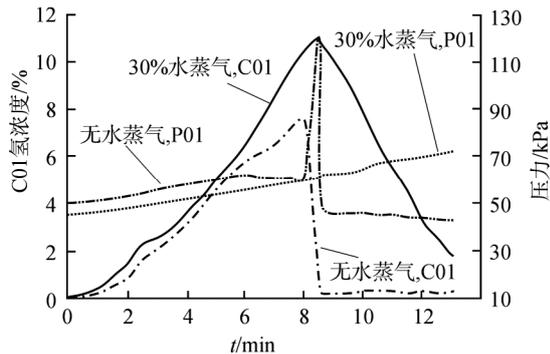


图 6 点火阈值试验曲线

Fig. 6 Test Curves of PAR Ignite Concentration

#### 4 结束语

在模拟严重事故工况下开展非能动条件下的 PAR 特性试验是 PAR 性能验证试验发展的方向。以反应容器模拟安全壳、配气系统实现试验所需环境条件的试验装置可用来开展非能动 PAR

的消氢特性试验。

PAR 的启动时间、启动阈值、消氢能力、点火阈值等关键特性在不同的试验方法和参数条件下测试结果也不同，在制定 PAR 消氢特性参数要求时需限定试验方法和试验参数条件，以便获得统一、定量的 PAR 消氢特性参数。

本文中提及的试验装置以及试验方法可以获得 PAR 在非能动条件下定量化的消氢特性参数，已经开展以此研究为基础的能源局核电行业标准《非能动氢气复合器的鉴定》的编制工作。

#### 参考文献：

- [1] Bachelierie 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]. Nuclear Engineering and Design, 2003, 221: 151-165.
- [2] Reinecke E A, Bentaib A, Kelm S, et al. Open issues in the applicability of recombiner experiments and modeling to reactor simulations[J]. Progress in Nuclear Energy, 2010, 52: 136-147.
- [3] Fineschi F, Bazzichi M, Carcassi M. A study on the hydrogen recombination rates of catalytic recombiners and deliberate ignition[J]. Nuclear Engineering and Design, 1996, 166: 481-494.

(责任编辑：孙 凯)