

文章编号:1000-582X(2003)05-0046-06

# 非能动堆芯应急冷却系统试验分析\*

彭云康<sup>1</sup>,李夔宁<sup>1</sup>,童明伟<sup>1</sup>,郑华<sup>2</sup>,肖泽军<sup>2</sup>

(1. 重庆大学 动力工程学院, 重庆 400044; 2. 中国核动力研究设计院, 四川成都 610041)

**摘要:**在改造后的 AC600 全压堆芯补水箱实验装置上, 实验研究了不同尺寸的冷段破口, 不同的堆芯补水箱压力平衡管以及自动卸压系统对非能动堆芯应急冷却系统瞬态特性的影响, 描述了实验过程及实验结果。为先进压水堆非能动堆芯应急冷却系统的设计提供了实验依据。

**关键词:**非能动堆芯应急冷却系统; 自动卸压系统; 实验

**中图分类号:**TK124

**文献标识码:**A

非能动安全概念是 20 世纪 80 年代提出的一种旨在提高核电站安全性和可靠性的新概念。其工作原理仍然采用现有压水堆核电站的主要工艺技术, 但在安全系统的设计上发生了根本的变化。大量采用了非能动的安全措施, 即利用流体被加热或蒸发、冷却或冷凝而产生的密度差形成驱动压头或位差形成的重力压头, 无需用任何外部动力, 在事故工况下, 实现应急堆芯冷却和安全过喷淋, 以导出堆芯和安全壳内的热量, 确保安全壳的完整性。这种非能动安全系统不仅简化了专设安全措施, 而且可减少人员干预产生的误动作, 改善了人机关系, 提高了核电站的固有安全性<sup>[1-3]</sup>。

## 1 试验研究内容

1) 研究不同尺寸的冷段破口、不同的堆芯补水箱 (CMT) 压力平衡管对非能动堆芯应急冷却系统瞬态特性的影响;

2) 研究自动卸压系统 (ADS) 投入方式对非能动堆芯应急冷却系统瞬态特性的影响, 为先进压水堆非能动堆芯应急冷却系统的设计提供试验依据。

## 2 试验装置简介

试验装置是在 AC600 全压堆芯补水箱实验装置的基础上改造而成的, 改造的主要内容如下:

1) 新增 1 台中压安注箱 (ACC) 和 1 台稳压器

(PRZ)。

2) 新增 1 套 ADS 系统。ADS 由 ADS1、ADS2 和 ADS3 三级自动卸压阀组成, 第一级 ADS1、第二级 ADS2 卸压阀安装在稳压器的蒸汽空间, 第三级 ADS3 卸压阀安装在系统热段上。试验装置中 ADS1 卸压阀选用 DN15, 管道选用  $\Phi 20 \times 2.5$  mm, ADS2、ADS3 卸压阀选用 DN32, 管道选用  $\Phi 38 \times 4.5$  mm。

3) 新增 1 台反应堆压力容器模拟 (RPV) 和 1 台 CMT。在原方案设计中, 仅考虑对原装置的 RPV 和 CMT 进行改造, 但对 RPV 和 CMT 进行在役检查时发现, 容器安全状况等级为 5 级, 主焊缝出现严重缺陷。为了不影响该子专题的研究进行, 需利用其原设计图纸, 重新加工 RPV 和 CMT。另在 RPV 内加入电热元件, 模拟堆芯衰变余热。

4) 对 CMT 顶部接管结构进行了改造。根据 AC600 全压堆芯补水箱实验结果<sup>[4-5]</sup>, 为防止或降低蒸汽直接流向 CMT 顶部, 改造结构见图 1。

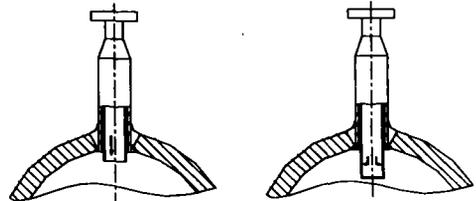


图 1 CMT 顶部接管结构图

\* 收稿日期: 2003-01-03

作者简介: 彭云康 (1966-), 男, 四川眉山县人, 研究员, 重庆大学博士研究生, 主要从事反应堆安全传热研究。

5) 实验装置中有 2 条压力平衡管连接到 CMT 顶部, 一条是从 PRZ 蒸汽空间连接到 CMT 顶部的蒸汽压力平衡管 (SPBL), 一条是从主管道冷段连接到 CMT 顶部的冷段压力平衡管 (CPBL)。

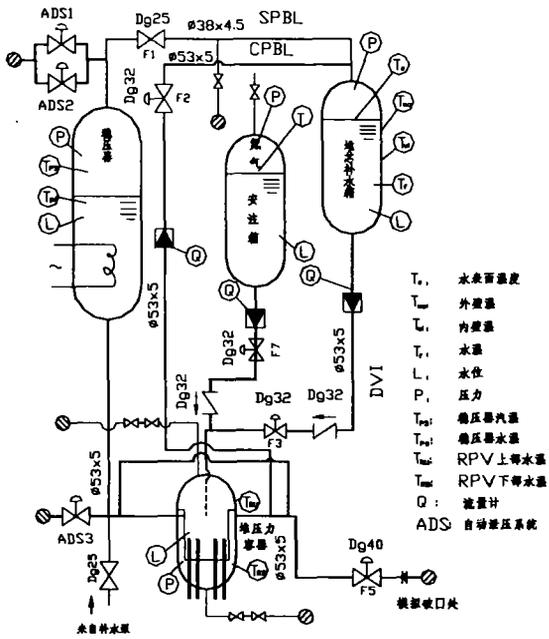


图2 试验装置流程图

6) 根据几何相似原则<sup>[6]</sup>, 用 2 mm、5 mm、10 mm

的破口, 模拟了原设计 30 ~ 140 mm 的破口尺寸。

7) 改进控制系统, 实现实验中阀门开启、衰变余热的投入等自动控制。

改造后的非能动堆芯应急冷却系统试验装置流程图如图 2 所示。该试验装置包括主回路系统、CMT 系统、ACC 系统、ADS 系统及补水系统。主要设备包括 RPV、CMT、ACC 和 PRZ 等, 其中 RPV 与原型设计的容积比为 1 : 200, ACC、CMT 和 PRZ 与原型设计的容积比为 1 : 57。试验装置的设计压力为 17.2 MPa, 设计温度为 350 ℃。

### 3 试验方法

非能动堆芯应急冷却系统试验按表 1 的试验工况进行。试验开始时, 数采系统开始采集数据, 然后在操作台上将按钮变为自动。控制系统自动打开破口处阀门, 系统开始卸压, 当 PRZ 水位和压力降到一定时, 自动打开 DV1 上的注水阀, 同时投入堆芯衰变余热; 系统压力降到 4.82 MPa 时, 自动开启 ACC 注水管道上的注水阀; 控制系统根据表 2 设定值, 投入 ADS 系统, 自动开启的各级阀门; CMT 水位低于 2.1 m 或系统压力低于 1.0 MPa 以下时, 试验结束。

表 1 试验研究内容

试验名称	破口直径/mm	破口位置	压力平衡管	ADS	CMT 投入
AP-CPBL-0	12	冷端	CPBL	按表 2 投入	$L_{PRZ} < 0.45$ or $P_{PRZ} < 12$
AP-CPBL-0	25	冷端	CPBL	按表 2 投入	$L_{PRZ} < 0.45$ or $P_{PRZ} < 12$
AP-CPBL-03	10	冷端	CPBL	按表 2 投入	$L_{PRZ} < 0.45$ or $P_{PRZ} < 12$
AP-CPBL-04	2	冷端	CPBL	不投入	$L_{PRZ} < 0.45$ or $P_{PRZ} < 12$
AP-CPBL-05	5	冷端	CPBL	不投入	$L_{PRZ} < 0.45$ or $P_{PRZ} < 12$
AP-SPBL-06	2	冷端	SPBL	不投入	$L_{PRZ} < 0.45$ or $P_{PRZ} < 12$
AP-SPBL-07	5	冷端	SPBL	不投入	$L_{PRZ} < 0.45$ or $P_{PRZ} < 12$
AP-CPBL-08	5	热端	CPBL	不投入	$L_{PRZ} < 0.45$ or $P_{PRZ} < 12$
AP-CPBL-09	2	冷端	CPBL	不投入	$L_{PRZ} < 2$ or $P_{PRZ} < 12$
AP-CPBL-10	2	冷端	CPBL	$L_{PRZ} < 0.5$ 时投入 ADS1	$L_{PRZ} < 2$ or $P_{PRZ} < 12$

表 2 CMT 水位控制 ADS 阀门开启表

投入级数	ADS1	ADS2	ADS3
CMT 水位/m	2.8	2.6	2.3

### 4 试验结果及分析

表 3 和表 4 给出非能动堆芯应急冷却系统试验工况的初始条件, 表 5 和表 6 给出对应试验工况主要事件发生序列。

表3 试验初始条件

名称	单位	试验名称				
		AP-CPBL-01	AP-CPBL-02	AP-CPBL-03	AP-CPBL-04	AP-CPBL-05
CMT 初始水位	m	3.09	3.09	3.09	3.09	3.09
ACC 初始水位	m	1.21	1.21	1.23	1.24	1.21
PRZ 初始压力	MPa	15.3	15.2	13.5	15.2	15.4
PRZ 初始水位	m	2.15	2.35	1.87	2.13	2.45
CMT 注水压力	MPa	12	12	12	12	12
压力平衡管	-	冷端	冷端	冷端	冷端	冷端
RPV 上部温度	℃	315	314	307	314	314
RPV 下部温度	℃	308	309	301	308	308
环境温度	℃	32	30	30	30	27
ADS 投入情况	-	投入	投入	投入	不投入	不投入

表4 试验初始条件

名称	单位	试验名称				
		AP-SPBL-06	AP-SPBL-07	AP-CPBL-08	AP-CPBL-09	AP-CPBL-10
CMT 初始水位	m	3.09	3.09	3.09	3.09	3.09
ACC 初始水位	m	1.2	1.22	1.21	1.23	1.2
PRZ 初始压力	MPa	15.3	15.5	15.1	15.3	15.4
PRZ 初始水位	M	2.03	2.05	1.9	3.2	3.15
CMT 注水压力	MPa	12	12	12	13.6	13.77
压力平衡管	-	蒸汽	蒸汽	冷端	冷端	冷端
RPV 上部温度	℃	313	313	314	313	313
RPV 下部温度	℃	307	306	309	306	309
环境温度	℃	30	30	31	33	30
ADS 投入情况	-	不投入	不投入	不投入	投入	投入

表5 试验中主要事件发生序列

名称	试验名称				
	AP-CPBL-01	AP-CPBL-02	AP-CPBL-03	AP-CPBL-04	AP-CPBL-05
破口开启时间	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
CMT 投入时间	700	109	33	618	111
ACC 投入时间	1 607	373	228.5	1 514	384
ACC 关闭时间	2 370.5	461	313.5	2 303	585
ADS1 时间	-	328	354	-	-
ADS2 时间	-	466	603	-	-
ADS3 时间	-	496	686	-	-
试验结束时间	3 500	563	945	5 209	1 160

表6 试验中主要事件发生序列

名称	试验名称				
	AP-SPBL-06	AP-SPBL-07	AP-CPBL-08	AP-CPBL-09	AP-CPBL-10
破口开启时间	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
CMT 投入时间	480.5	124	135	419	315
ACC 投入时间	1 384	382	556	1 882	1 085.5
ACC 关闭时间	3 242	656	896	-	-
ADS1 时间	-	-	-	1 027.5	-
ADS2 时间	-	-	-	-	-
ADS3 时间	-	-	-	-	-
试验结束时间	3 475	750	1 874.5	6 690.5	2 118.5

### 4.1 触发信号及破口尺寸对 ADS1 开启的影响

AP-CPBL-01、AP-CPBL-02 和 AP-CPBL-03 分别为模拟破口直径 2 mm、5 mm 和 10 mm 的试验工况,ADS1 开启的触发信号为 CMT 水位达到 2.8 m。对 AP-CPBL-01 工况,ADS1 在 3 000 s 内处于关闭状态,最后手动打开;对 AP-CPBL-02 和 AP-CPBL-03 工况,ADS1 分别在 328 s 和 354 s 时开启。图 3 为系统瞬态试验过程中 CMT 水位变化曲线,由图可见,在 3 000 s 内,AP-CPBL-01 工况的 CMT 水位基本不变,CMT 水位不能触发 ADS1 开启;对 AP-CPBL-02 和 AP-CPBL-03 工况,CMT 水位下降很快,分别在 328 s 和 354 s 时 CMT 水位达到 2.8 m,从而触发 ADS1 开启。

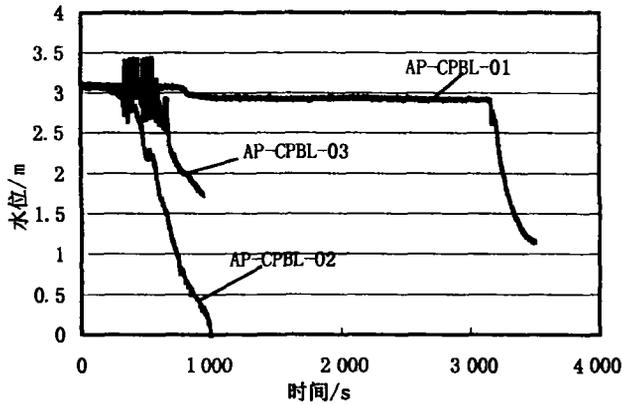


图 3 CMT 水位变化曲线

图 4 为系统瞬态试验过程中 PRZ 水位变化曲线,由图可见,AP-CPBL-01、AP-CPBL-02 和 AP-CPBL-03 3 种工况下 PRZ 水位下降很快,因此在小破口情况下,可考虑用 PRZ 水位触发 ADS1 的开启,能够有利于 CMT 和 RPV 注水和冷却。

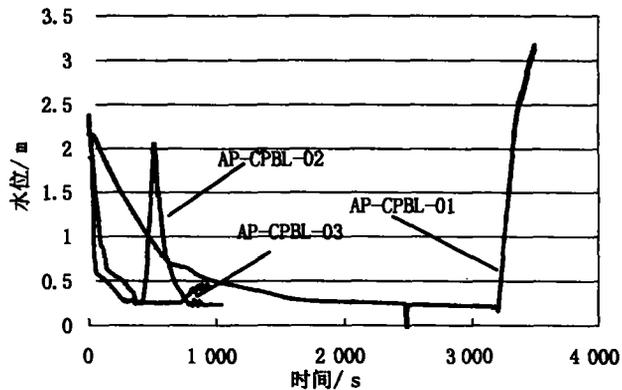


图 4 PRZ 水位变化曲线

图 5、图 6、图 7 分别为 AP-CPBL-09 和 AP-CPBL-10 工况的 PRZ 水位、CMT 水位和 PRZ 压力随时间变化的比较曲线,对 AP-CPBL-09 工况,ADS1

开启的触发信号为 CMT 水位达到 2.8 m。对 AP-CPBL-10 工况,ADS1 开启的触发信号为 PRZ 水位达到 0.5 m;由图可知,对 AP-CPBL-09 工况,在 6 000 s 内 CMT 水位基本不变,保持约 3 m。对 AP-CPBL-10 工况,约 1 027 s 时 PRZ 水位从 3.15 m 降至 0.5 m,触发 ADS1 开启;当 ADS1 开启后,PRZ 压力下降较快。

因此,在小破口情况下,PRZ 水位触发 ADS1 开启值得进一步研究。

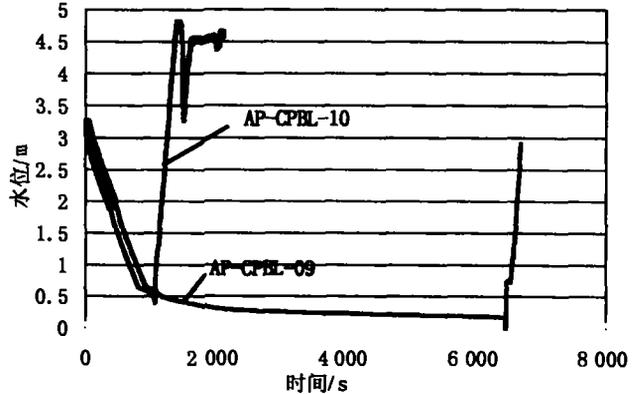


图 5 PRZ 水位变化曲线

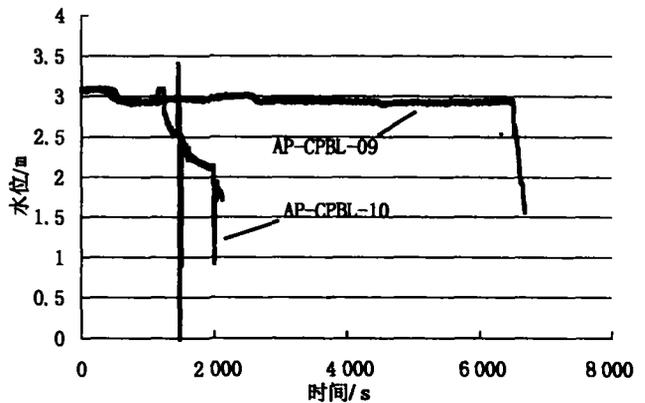


图 6 CMT 水位变化曲线

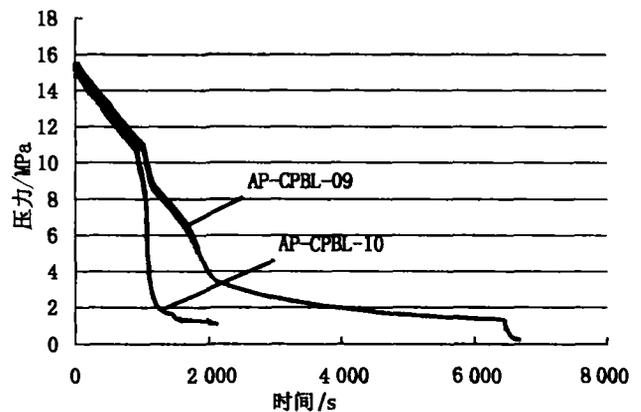


图 7 PRZ 压力变化曲线

### 4.2 CMT 压力平衡管及 ADS1 开启对系统瞬态特性的影响

如表 1 所示, AP-CPBL-02、AP-CPBL-05 和 AP-CPBL-07 分别为破口尺寸 5 mm 下的 3 种不同条件下的试验工况, CMT 压力平衡管及 ADS1 开启对系统瞬态特性的影响见图 8 至图 12。

如图 8 所示, 在 DV1 上阀门自动开启前, 3 种工况的系统压力下降速率基本一致; 约 110 s 后, 3 种工况的系统压力下降到 12 MPa, CMT 开始向 RPV 补水。

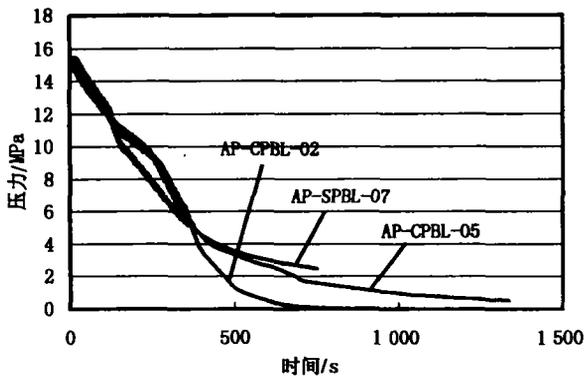


图 8 5 mm 破口不同工况时系统压力曲线

如图 9 所示, 在 ADS1 开启前, 对采用蒸汽平衡管的 AP-CPBL-07 工况, DV1 流量较其它 2 个采用冷段平衡管的 AP-CPBL-02 和 AP-CPBL-05 工况大, CMT 注水对 RPV 冷却作用更大, 系统压力下降更快, 但会产生压力脉动。

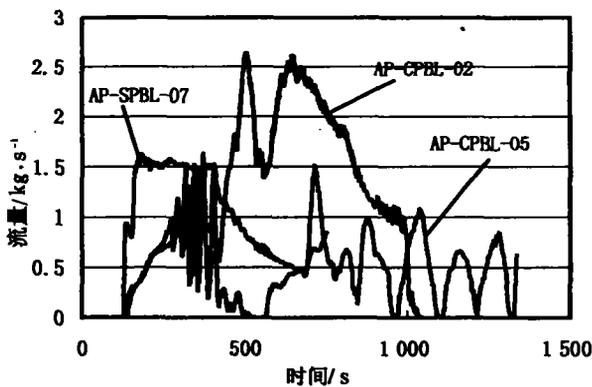


图 9 5 mm 破口 DV1 流量曲线

如图 10 所示, 大量蒸汽从 PRZ 流向 CMT, 并在 CMT 内快速冷凝, 产生汽锤, 造成 CMT 内的压力波动。在 CMT 投入约 5 s 时, CMT 内压力产生 0.2 MPa 的波动; 在 CMT 投入约 35 s 时, CMT 内形成最大压力波动, 波动值为 0.34 MPa。

如图 11 所示, 对 AP-CPBL-07 工况, 由于 CMT 补水流量大, RPV 水位保持在堆芯顶部以上, CMT 对堆芯补水作用很明显; 对 AP-CPBL-02 和 AP-CP-

BL-05 工况, RPV 水位降到堆芯顶部以下 200 s, 并且最低水位在 0.9 m 左右。当 ADS 开启以及 ACC 投入以后, RPV 水位又升到 1.1 m 以上。

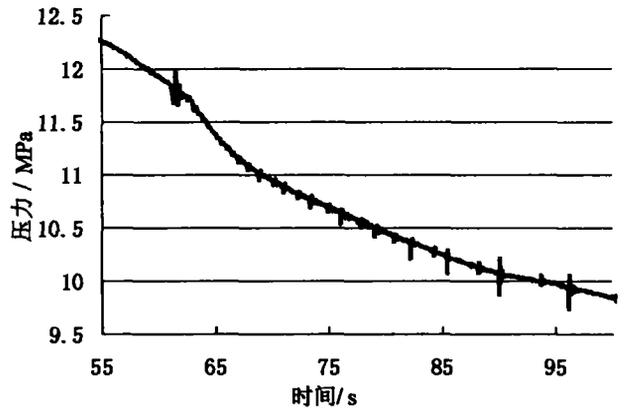


图 10 AP-CPBL-07 CMT 刚投入时压力曲线

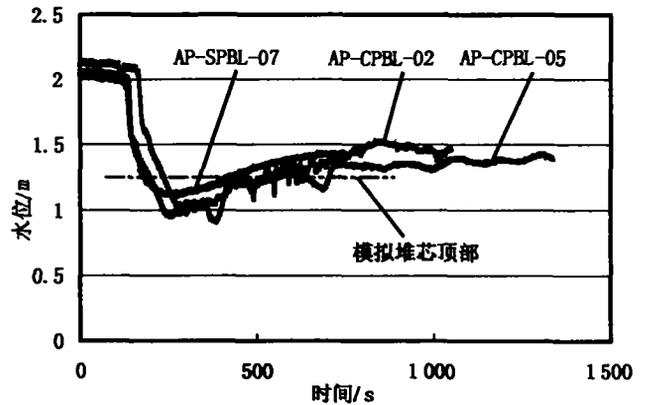


图 11 5 mm 破口 RPV 水位曲线

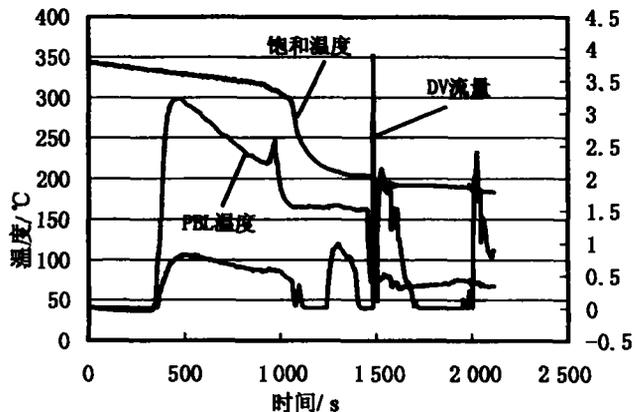


图 12 AP-CPBL-10 CPBL 温度和 DV1 流量曲线

图 12 是 CPBL 温度和 DV1 流量曲线图, 当试验进行到 1000 s 时, ADS1 开启, 使系统压力快速下降, RPV 上部热水快速闪蒸, RPV 水位快速下降到 1 m 左右, 同时系统压力降到 4.82 MPa 以下, ACC 注水阀开启, ACC 开始向 RPV 补水, ACC 注水管与 CMT 注水管

接在同一根管道上,当 ACC 开始注水后,CMT 注水量突然增大。

## 5 结论

通过非能动堆芯应急冷却系统试验研究,得到以下结论:

1) 采用冷段平衡管和蒸汽平衡管 2 种压力平衡管方式,CMT 都能对 RPV 注水和冷却,但采用蒸汽平衡管方式对 CMT 的破坏性大,会产生汽锤现象。

2) 对小破口工况,触发信号对 CMT 开启影响很大,PRZ 水位触发 ADS1 开启值得研究;ADS 开启导致系统压力快速下降,有利于 CMT 和 ACC 对 RPV 冷却和注水,这对采用冷段平衡管尤其重要。

### 参考文献:

[1] SANG II LEE, HEE CHEON NO. Gravity Injection Experiments and Direct - Contact Condensation Regime Map for Passive High - Pressure

Injection System[ A]. The Fifth International Topical Meeting on Nuclear Thermal Hydraulics[ C]. Beijing, China: Operations and Safety, 1997.

[2] R. MUNTHER. Gravity Driven Emergency Core Cooling Experiments with the PACTEL Facility [J]. Proceedings of an Advisory Group Meeting, 1996, (357):219 - 230.

[3] 付宵华. AC600 非能动安全系统研究[D]. 成都:中国核动力研究设计院,1998.

[4] 陈炳德,宗桂芳,李长林. AC600 非能动安全系统首期实验研究[J]. 核动力工程,2000,21(1): 21 - 24.

[5] 李长林,郑华. AC600 全压堆芯补水箱补水实验研究[R]. 成都:中国核动力研究设计院,1998.

[6] 高琅琅,姜胜耀,张佑杰,等. 重力注硼系统压力响应特性实验研究[J]. 核动力工程,2000,21(3):232 - 238.

## Experimental Investigation of Passive Emergency Core Cooling System

PENG Yun-kang<sup>1</sup>, LI Kui-ning<sup>1</sup>, TONG Ming-wei<sup>1</sup>, ZHENG Hua<sup>2</sup>, XIAO Ze-jun<sup>2</sup>

(1. College of Power Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. Nuclear Power Institute of China, Chengdu 610041, China)

**Abstract:** The effect of different break size at cold leg, different pressure balance line and automatic depressurize system on transient behavior of passive emergency core cooling system was investigated on the AC600CMT test facility. The experiment process and experiment results were described.

**Keywords:** passive emergency core cooling system; automatic depressurize system; experiment

(责任编辑 陈移峰)