

文章编号：0258-0926(2016)05-0010-05；doi: 10.13832/j.jnpe.2016.05.0010

安全壳外液膜流动延迟时间的试验研究

鲁仰辉，王彦之，刘璐，王妍

国核华清（北京）核电技术研发中心有限公司，北京，102209

摘要：非能动安全壳冷却水系统响应至壳外水膜稳定的时刻称为延迟时间。延迟时间是非能动换热、核安全系统设计等方面的关键参数。在重力作用下，大空间曲率表面降膜流动覆盖安全壳表面有 2 个过程：水流向下流动，导致原干区变为湿区；因水膜的半稳定性，横向润湿干区，使得接触角变小，缓慢增加水膜覆盖区域。2 个过程的耦合导致难以判定壳外水膜稳定的时刻。本文根据非能动大型先进压水堆核电站 CAPI400 水分配试验，在获得收集水槽液位、流量和水膜覆盖图片等数据的基础上，通过图像处理方法及对比分析，提出流量稳定和覆盖稳定 2 种判定水膜稳定的方法，解决延迟时间的计算问题，得到不同分水结构形式下延迟时间随流量的变化趋势和规律。

关键词：非能动安全壳；延迟时间；稳态判定；流量稳定法；覆盖稳定法

中图分类号：TL364+.3 **文献标志码：**A

Experimental Research of Quasi-Steady Time of Liquid Film Flow on Containment

Lu Yanghui, Wang Yanzhi, Liu Lu, Wang Yan

State Nuclear Power Technology R&D Center, Beijing, 102209, China

Abstract: Quasi-steady time characterized the response of the water film to the steady state in the passive containment cooling system. It is a key factor in the heat transfer and design of the nuclear safety system. There are two processes during the falling film covering the containment surface. The first process is water flows down, resulting in a wet area; the second is water laterally wet the dry area due to its semi-stability, and the contact angle becomes smaller and slowly increases the coverage area. Coupling of the two processes makes it difficult to determine the quasi-steady time. On the basis of the results of collection tank level, flow and pictures of water film coverage in CAPI400 water distribution experiment, present study proposed two methods to determine the stability of the water film, which are flow balance method and coverage stable method. It solved the calculation problem of quasi-steady time and provided a new way for determining the stability of the water film, and furthermore, relations of relative quasi-steady time with Reynolds number based on different distribution water structures are obtained.

Key words: Passive containment, Quasi-steady time, Steady-state determination, Flow balance method, Coverage stable method

0 引言

利用空气自然对流以及水膜蒸发，第三代压水堆在基准事故中能通过非能动安全壳冷却系统排放热量。上世纪末至本世纪初，中国核动力研

究设计院在跟踪世界核电发展趋势基础上，开发了中国改进型压水堆核电站 AC600，并开展了相应试验及安全分析研究^[1]。2007 年，我国全面引进 AP1000 三代压水堆核电技术，并启动大型先

收稿日期：2015-11-18；修回日期：2015-12-20

基金项目：国家科技重大专项资助项目（2010ZX06002-005）

作者简介：鲁仰辉（1981—），男，工程师，现主要从事反应堆安全分析及试验技术研究

进压水堆核电站重大专项,计划在消化、吸收引进的三代核电 AP1000 先进技术基础上,通过再创新开发 CAP1400 标准设计,形成我国具有自主知识产权的第三代先进核电技术。

CAP1400 非能动安全壳冷却系统仍采用 AP600 和 AP1000 先进的非能动设计思想带走事故后安全壳内的热量,根据安全壳结构特点及液膜传热特性,均匀水膜更有利于带走堆芯衰变热。在发生假想事故时,壳内热量主要通过水膜蒸发及过冷液膜显热方式带走。非能动安全壳^[2]顶部及外壁面依次布置有安全壳冷却水箱、分水斗、围堰等装置,能在安全壳穹顶及筒体形成较均匀的水膜,其形成稳定水膜所需的时间被称为延迟时间,是影响换热速率的关键参数。延迟时间的长度关乎安全壳外水膜能否在预期时间内达到稳定,对安全壳传热及内部峰值压力有重要影响,是安全壳及其水分配系统设计必须要考虑的因素。

为验证 CAP1400 非能动安全壳流量、覆盖率和延迟时间的定量关系,开展了 CAP1400 非能动安全壳冷却系统水分配试验的台架建设及关键技术研究。

水分配试验台架以 CAP1400 安全壳为原型,取穹顶的 1/8 扇面(第二道围堰下方的部分为 1/16)及一定长度的竖直壁面,按 1:1 比例设计的单项性能试验台架。试验台架主要由试验本体、回路系统、支架系统和测控系统及辅助系统等组成。辅助系统设施包括水供应系统和电气系统。试验本体上方布置有可供拆卸更换的分水结构(分水斗和围堰^[3]),以便于水流的均匀分配。

水分配试验时,冷却水由储水箱提供;变频器和调节阀将流量调到预定值后,通过给水泵、进水管泵入悬于安全壳穹顶上方的分水斗进行初始分配;冷却水流到安全壳壁面,通过第一道收集坝进入一道围堰分配盒;分配盒再将水流分配到围堰的堰槽,由分配槽上的 V 形槽形成水流向下覆盖安全壳表面;随后冷却水通过第二道收集坝进入二道围堰,再次由分配盒和围堰的堰槽及其上的 V 形槽进行分配;此后安全壳表面已能形成较为均匀的水膜^[4]。延迟时间是从水流进入试验本体表面开始至水膜达到稳定为止的时间,将受到本体结构尺寸、壳表面涂层状态、水流流量与温度等多重因素影响。

在重力作用下,大空间曲率表面降膜流动覆盖安全壳表面有 2 个过程:水流向下流动,导致原干区变为湿区;因水膜的半稳定性,横向润湿了干区,使得接触角变小,缓慢增加水膜覆盖区域。2 个过程的耦合导致难以判定大空间表面的水膜稳定时刻。近年来针对液膜流动稳定性进行了线性、非线性分析法,实验研究了临界流量,定性地得出稳定性随倾角和雷诺数增大逐渐减小^[5],但未见到关于液膜流动延迟时间的研究公开文献。本文以 CAP1400 非能动安全壳水分配试验为基础,重点关注整体进口冷却水流量与出口冷却水流量稳定及安全壳整体表面覆盖率稳定,以此研究延迟时间。分别采用整体水膜稳定性判定的流量稳定法和覆盖稳定法测量各种流量工况下的延迟时间。对试验数据进行处理分析,得到不同流量及不同分水结构对延迟时间的影响规律。

1 流量稳定法

1.1 思路

定义延迟时间的起点为分水斗出水时刻,终止时刻为进口冷却水流量与出口冷却水流量平衡时刻。通过计算上、下收集水槽单位时间体积的变化,与进口流量进行比较,两者达到稳定平衡的时刻作为终止时刻,从而计算延迟时间。

1.2 测量方法

每次试验完成后,为核定试验的成败与否,先通过储水箱水量变化、流量计积分流量和收集水槽收集水量 3 者的质量平衡验证测量系统的一致性。然后根据出口流量(收集水槽液位)的变化趋势及其与预定设定的进口流量(流量计示值)的接近程度(达到 95%),界定水膜达到稳定的时间区间,即确定延迟时间的终止时刻范围。

由于收集水槽收集水量的总和仅是流出的主要部分,水膜在壁面的蒸发、分水斗下部溢出或溅出等会带走小部分水量,同时试验的仪表本身也存在一定的精度误差,故通过对储水箱液位测量、流量计测量以及收集水槽液位的测量结果相互比对计算,以 3 者最大误差不超过 5% 作为试验质量平衡满足要求的准则。

1.3 算例分析

以某次试验为例,试验完成后分别计算储水

箱变化水量 (V_1)、流量计积流量 (V_2) 及收集水槽收集水量 (V_3)，结果如下： $V_1=1.474 \text{ m}^3$ ； $V_2=1.481 \text{ m}^3$ ； $V_3=1.447 \text{ m}^3$ ； V_2 与 V_3 的最大误差为 2.29%。

根据收集水槽液位，得到出口流量随试验时间的变化如图 1 所示。由图 1a 可以看出，出口流量随试验时间的变化呈现比较大的波动，但仍可以看出其整体趋势为随试验时间逐渐增大，一段时间后逐渐达到稳定，稳定值在 $0.0008 \text{ m}^3/\text{s}$ 附近波动，接近进口流量。由于流量较小且有波动，根据图 1a 判断稳定时间较为困难。为了减小对延迟时间判断的干扰，图 1b 对试验过程中每 30 s 出口流量取平均值，给出其随试验有效时间的变化，可以判断出口流量稳定时间段为 930~960 s。

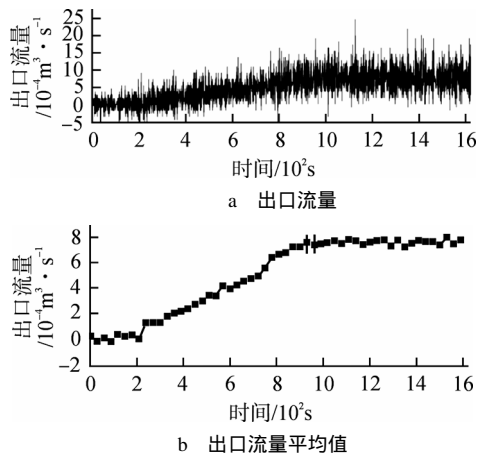


图 1 某次试验出口流量趋势图
Fig. 1 Trend of Export Flow in a Test

2 覆盖稳定法

2.1 思路

定义延迟时间起点为分水斗出水时刻，终止时刻为本体水膜覆盖达到稳定时刻。可通过试验视频采集系统获得的水膜覆盖率随时间变化趋势及覆盖率增长特点，确定延迟时间终止时刻，进而计算出延迟时间。

2.2 测量方法

首先根据水分配试验视频采集系统获得覆盖率变化趋势。视频采集系统主要由数字电荷耦合器件 (CCD) 相机、高速图像采集系统、图像处理系统等模块构成 (图 2)。其中，数字 CCD 相机采用面阵 CCD 传感器。通过围堰系统将试验本体分为 6 个目标区域，每个 CCD 相机对准 1 个目

标区域。高速图像采集系统实时将数字相机输出的图像信号传给工控机进行存储；图像处理系统对获取的图像进行算法处理，分别得到 6 个分区的覆盖率，并计算合成输出水膜整体覆盖率^[6]。

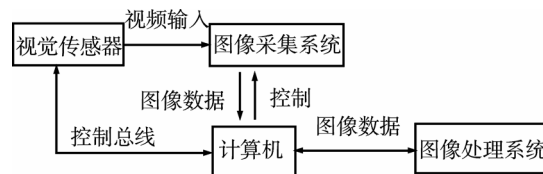


图 2 水分配视觉采集系统基本组成
Fig. 2 Basic Composition of Video Acquisition System

以视频原始图片为依据，确定安全壳起拱线处水膜覆盖长度比稳定的原始图片对应时刻，减去冷却水注入分水斗的原始图片对应的时刻，得出延迟时间。由于每次试验图片量巨大，需进行多组图片的比对，完整流程如下：由 6 号视频相机 (拍摄试验本体顶部区域)，根据图片判定分水斗出水时刻；通过软件计算分区覆盖率并汇总合成整体覆盖率；确定单位流量下覆盖率增长率，即覆盖率增长值与流量值之比。采用此流量归一化处理方式，是因为流量越大，覆盖率增长越快，不同流量不宜设置统一限值；二道围堰出水后，获取单位流量下覆盖率增长率降至 0.3% 以下的第一张 1 号相机原始图片；比对一定范围内 1 号相机 (拍摄二道围堰下部区域) 原始图片及试验结束时 1 号相机原始图片，确定安全壳起拱线处水膜覆盖长度比稳定的原始图片范围；标出延迟时间在整体覆盖率图中的范围。

以上步骤、仅为尽快从大量图片中找到稳定覆盖判断的原始图片，该方法的误差主要来源于步骤的判定过程。

2.3 算例分析

仍以某次试验为例，提取每分钟覆盖率增长值和单位流量下覆盖率增长率，得到表 1。

整体覆盖率 (实线)、每分钟覆盖率增长值 (虚线) 如图 3 所示。

单位流量下覆盖率增长率如图 4 所示，虚线为 0.3% 的分界线。二道围堰出水后，单位流量下覆盖率增长率很快降至 0.3% 以下，2 条线的交点时间约为 990 s。二道围堰出水后，单位流量增长率降至 0.3% 以下的时间约为 990 s。进一步结合附近原始图片确定覆盖率稳定的时刻为 $990 \pm$

表 1 某试验覆盖率变化表
Table 1 Coverage Changing in a Test

| 时间/s | 整体覆盖率/% | 覆盖率增长值 | 单位流量下覆盖率增长率/% |
|------|---------|--------|---------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 60 | 12.4 | 0.124 | 3.65 |
| 120 | 16.1 | 0.037 | 1.09 |
| 180 | 19.2 | 0.031 | 0.91 |
| 240 | 25.9 | 0.067 | 1.97 |
| 300 | 30.9 | 0.05 | 1.47 |
| 360 | 41.2 | 0.103 | 3.03 |
| 420 | 44.4 | 0.032 | 0.94 |
| 480 | 45.6 | 0.012 | 0.35 |
| 540 | 47.1 | 0.015 | 0.44 |
| 600 | 49.6 | 0.025 | 0.74 |
| 660 | 51.2 | 0.016 | 0.47 |
| 720 | 56.4 | 0.052 | 1.53 |
| 780 | 64.1 | 0.077 | 2.26 |
| 840 | 69.5 | 0.054 | 1.59 |
| 900 | 73.1 | 0.036 | 1.06 |
| 960 | 74.5 | 0.014 | 0.41 |
| 1020 | 75.1 | 0.006 | 0.18 |
| 1080 | 75.8 | 0.007 | 0.21 |
| 1140 | 76.2 | 0.004 | 0.12 |
| 1200 | 76.4 | 0.002 | 0.06 |
| 1260 | 77.2 | 0.008 | 0.24 |
| 1320 | 77.5 | 0.003 | 0.09 |
| 1380 | 77.8 | 0.003 | 0.09 |
| 1440 | 77.8 | 0 | 0 |
| 1500 | 78.2 | 0.004 | 0.12 |
| 1560 | 78.8 | 0.006 | 0.18 |

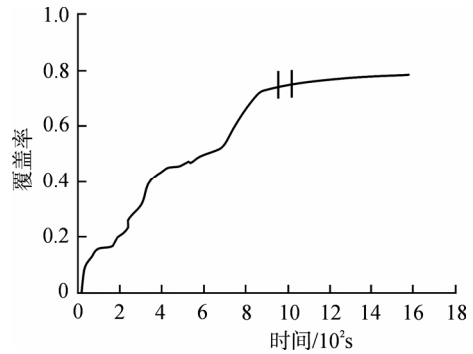


图 5 整体覆盖率与稳定时间范围
Fig. 5 Over all Coverage and Stable Time Range

对比图 1 和图 5, 2 种判定方法针对某次试验的延迟时间计算结果基本一致。在流量平衡以后, 因水流横向润湿干区使得覆盖率缓慢增加, 即覆盖率达到稳定略微晚于延迟时间, 所以覆盖稳定法判定的延迟时间略大于流量稳定法。

对于延迟时间, 2 种判定方法都需结合仪表记录数据的分析及试验观察, 流动和覆盖率稳定皆是相对概念, 在分析及观察过程中难免存在一定误差, 液位计及相机响应时间和精度也是误差源之一。为尽可能确保试验结果的准确性, 试验前对所有关键仪表进行系统标定, 并对多次重复性试验工况的结果进行了对比分析进行验证。

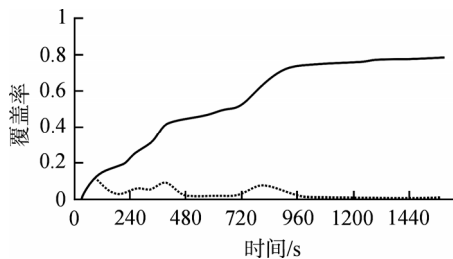


图 3 整体覆盖率与每分钟整体覆盖率增长值
Fig. 3 Over all Coverage and Coverage Growth Per Minute

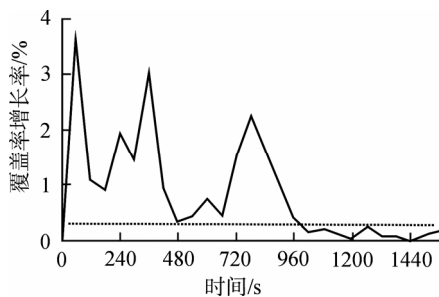


图 4 单位流量增长率
Fig.4 Growth Rate for Unit Capacity

30 s。整体覆盖率与稳定时间范围如图 5 中 2 竖线之间。

3 结果分析

本文在试验本体结构(含涂层)已定的情况下, 开展了不同流量、不同分水结构工况下的试验。不同分水结构包括原型结构形式、变分水斗结构形式和变围堰结构形式。相对于原型结构, 改变分水斗和改变围堰仅调整了开槽数量和槽道尺寸, 主体结构形式没有变化。液膜雷诺数 Re 定义为:

$$Re = \frac{4\Gamma}{\mu} \quad (1)$$

式中, Γ 为单位宽度的质量流量, $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$; μ 为动力粘度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$ 。

由于试验本体从上至下直径逐渐增加, 即对应的线流率相应减小, 为便于分析, 结合安全壳表面特征, 定义特征长度变量 L , $\Gamma = Q/L$, Q 为水流质量流量, kg/s 。在不同流量下, 雷诺数覆盖范围约为 150~1100。

设定安全壳初始流量下理想安全时间为 t_0 , 各流量(对应相应雷诺数)下实际延迟时间为 t ,

则可对延迟时间进行无量纲化,得到相对延迟时间 $\tau' = t / t_0$ 。针对不同雷诺数,通过前述的2种计算方法得到了不同分水结构下的延迟时间。

3.1 原型结构

图6为本试验得到的原型结构形式下的相对延迟时间随雷诺数的变化关系,对曲线进行指数拟合,有:

$$\tau' = 9e^{-Re/170} + 1 \quad (2)$$

从图6可以看出,同流量(雷诺数)下2种延迟时间(相对)计算结果相差无几,再次印证了2种计算方法的适用性;相对延迟时间随雷诺数增加呈下降指数曲线变化趋势并逐步达到稳定。形成这一现象的原因是:随着雷诺数增加,水流更快达到稳定状态,当 $Re > 800$ 时,相对延迟时间基本不再变化,其值接近于1,这是由于此时水膜已进入紊流状态,进入试验本体后,迅速铺展整个本体表面,而因水膜的半稳定性带来的覆盖率缓慢增加成为次要影响因素。

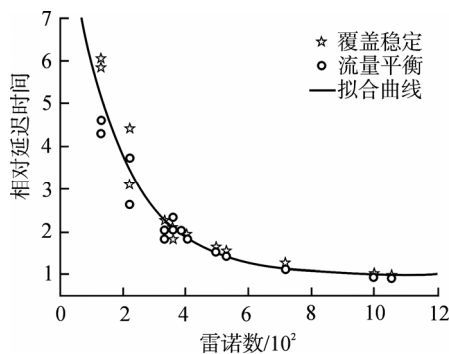


图6 原型结构相对延迟时间随雷诺数变化规律

Fig. 6 Changing of Relative Quasi-Steady Time with Reynolds Number Based on Prototype Structure

3.2 变分水结构

仍以原型结构下相对延迟时间随雷诺数变化关系为拟合曲线,增加变分水结构形式下(2套变分水斗结构及2套变围堰结构)的相对延迟时间分布点,得到图7。

从图7可以看出,除个别点外,无论变分水斗结构还是变围堰结构,其相对延迟时间随雷诺数变化趋势与原型结构基本一致,在试验本体及分水结构主体结构形式不改变、仅是分水结构局部调整的情况下,对水膜延迟时间和稳定性的影响基本可以忽略不计。

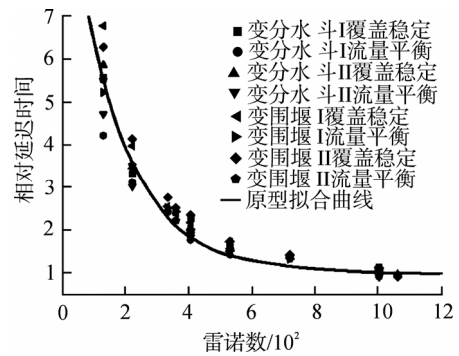


图7 变分水结构相对延迟时间随雷诺数变化规律

Fig. 7 Changing of Relative Quasi-Steady Time with Reynolds Number Based on Variable Structure

4 结论

本文简要介绍了非能动安全壳冷却系统特点和CAP1400非能动安全壳水分配试验装置。针对大空间表面液膜流动稳定性难以判定问题,以水分配试验获得的数据为基础,采用物理判定与数据分析相结合的方式,提出了流量稳定和覆盖稳定2种判定水膜稳定的方法,解决了延迟时间的计算问题。结合某次特定试验,通过2种延迟时间判定方法计算的结果对比可知,误差在5%之内,印证了2种判定方法的可信性。同时根据不同流量下延迟时间的2种计算结果,分析得到了相对延迟时间随雷诺数呈下降抛物线变化的趋势和规律,分水结构的局部调整对延迟时间的影响基本可以忽略不计。对于此类大空间表面的液膜流动稳定性判定问题,本文阐述的计算判定方式提供了一种有效解决手段。

参考文献:

- [1] 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): 63-67.
- [2] 林诚格,赵瑞昌,刘志弢. 安全壳在事故情况下的完整性分析[J]. 核科学与工程. 2010, 30(2): 181-192.
- [3] 林城格,郁祖盛,欧阳予. 非能动安全先进核电站AP1000[M]. 北京:原子能出版社,2008.
- [4] 鲁仰辉,常华健,赵瑞昌,等. 大功率压水堆PCS水分配试验系统设计与实现[J]. 原子能科学技术, 2016, 50(5): 835-840.
- [5] 叶学民,阎维平. 液体薄膜流稳定性和破断特性的研究进展[J]. 华北电力大学学报. 2006, 33(6): 63-67.
- [6] 张子杨,鲁仰辉等. 基于视频技术的大空间内液膜覆盖率的测量方法研究[J]. 中国科技成果. 2013(9): 56-59.

(责任编辑:孙凯)