

大功率压水堆 PCS 水分配 试验系统设计与实现

鲁仰辉, 常华健, 赵瑞昌, 王彦之, 王妍, 刘璐

(国核华清(北京)核电技术研发中心有限公司, 北京 102209)

摘要:针对大功率非能动安全壳基准事故下的水流特征,采用和原型安全壳相同尺寸比例及切片形式,设计了椭圆扇面试验台架装置和相应的测量系统以研究安全壳穹顶水膜覆盖率和延迟时间等关键参数与冷却水流量之间的关系。同时开发了大空间曲率表面的视频测量系统,通过电容探针及其三维可调节支架系统实现了本体各处的水膜厚度非接触式测量,并对关键测量系统进行了标定。初步分析结果表明,试验本体及回路设计合理可行,获得了水膜覆盖率和相对延迟时间随雷诺数的变化关系。

关键词:非能动安全壳冷却系统;水分配试验;水膜覆盖率;水膜厚度;延迟时间

中图分类号: TL364.3

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2016)05-0835-06

doi: 10.7538/yzk.2016.50.05.0835

Design and Realization of Water Distribution Experiment System for High-power Pressurized Water Reactor PCS

LU Yang-hui, CHANG Hua-jian, ZHAO Rui-chang,

WANG Yan-zhi, WANG Yan, LIU Lu

(State Nuclear Power Technology R&D Centre, Beijing 102209, China)

Abstract: Aimed at the water flow characteristic under design basis accident (DBA) for high-power pressurized water reactor passive containment cooling system, a full scale but sector style of the containment was adopted. In order to study the relationship between the flow rate and the key parameters such as water film coverage rate, quasi-steady time etc., an ellipsoid sector test facility and respective measurement system were designed. A high-speed image measurement system for large curvature surfaces was also designed. The water film thickness measurement system was designed to obtain the accurate film thickness data by non-contact electric capacitance probes and related three-dimensional adjustable bracket system. All the important measurement systems were calibrated. Preliminary analysis results show that the design of test body and loop is reasonable. The trends of water film coverage rate and the relative quasi-steady time with different Reynolds numbers are obtained.

Key words: passive containment cooling system; water distribution experiment; water film coverage rate; water film thickness; quasi-steady time

核电作为一种清洁高效的能源,在增加能源供应、优化能源结构和应对气候变化中具有重大的战略意义。目前有关国家正在开发新一代核电技术,其中第三代非能动安全核电技术在简化设备复杂性的同时,进一步提高了核电的安全性和经济性。国家核电技术公司在受让第三代先进核电技术,实施相关工程设计和项目管理的基础上,积极通过消化吸收再创新形成中国核电自主知识产权品牌 CAP1400。大功率的 CAP1400 非能动安全壳冷却系统(PCS)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。为验证 AP600 的 PCS 性能,美国西屋公司开展了 AP600 水分配试验^[1]。但相比 AP600 和 AP1000,CAP1400 的堆芯衰变热增加,事故下所需的冷却水流量增加;其安全壳直径更大,安全壳穹顶结构、焊缝布置和围堰结构(包括尺寸和位置)也不同,安全壳曲率发生变化,水流从上至下,需经过穹顶、一道围堰和二道围堰的再分配,水流状态较为复杂。这些都将影响安全壳穹顶和侧壁的水膜覆盖规律以及水膜达到稳定的延迟时间,因此 AP600 水分配试验的结果不适用于 CAP1400。

本文对 CAP1400 PCS 水分配试验系统进行设计,研究安全壳穹顶的水膜覆盖规律,并获得准确的壳外冷却水膜稳定建立的延迟时间。

1 试验装置设计

CAP1400 PCS 水分配试验台架是以 CAP1400 安全壳为原型,取穹顶的 1/8 扇面(第 2 道围堰下方的部分为 1/16)及一定长度(3 m)的竖直壁面,按 1:1 比例设计的单项性能试验台架。试验台架高近 20 m,直径超过 40 m,包括试验本体(含水分配结构系统,即分水斗和围堰)、回路系统、支架系统、测控系统及辅助系统,辅助系统设施包括水供应系统和电气系统。水分配试验流程示于图 1。

1.1 试验本体

试验本体采用与原型电站 CAP1400 安全壳同比例设计,根据 CAP1400 的结构尺寸,考

虑到试验规模、钢板加工难度以及测量等限制因素,以最下方围堰上部穹顶全尺寸的 1/8 扇面和最下方围堰下部穹顶的 1/16 扇面,再加上 3 m 的垂直侧壁构成了试验段。试验本体由多块钢板拼焊而成,并进行了适当角度的焊接。整个试验板表面均进行了喷砂处理以使涂层容易附着,涂层的选用及喷涂工艺与 CAP1400 安全壳选用的类型与方式相同。试验台架本体部分采用了一次性放样下料,用覆膜的方式与高精度弧形支架进行整体焊接,并进行局部校形,保证了试验本体表面曲率与原型安全壳一致,成功解决了试验本体无现成模具可用且面积较大不易一次成型的问题。试验本体在安全壳上方设有分水斗及围堰系统等分水结构,分水斗结构较为简单,为原型筒体的 1/8 扇面切体,在柱面侧开槽,通过套筒固定在穹顶之上,以方便拆卸和旋转。水分配试验本体装配示意图如图 2 所示。

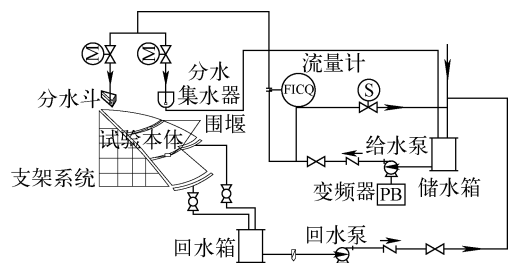


图 1 水分配试验流程图

Fig. 1 Process diagram of water distribution experiment

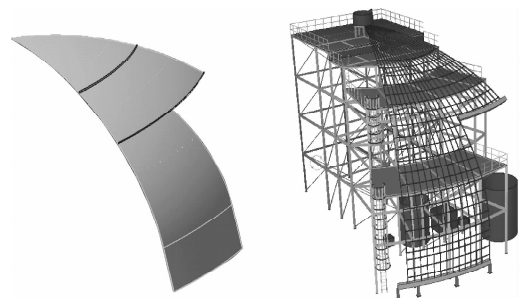


图 2 水分配试验本体装配示意图

Fig. 2 Assembly schematic of water distribution test body

1.2 试验回路

试验前储水箱充入试验用水(模拟原型安全壳冷却水),给水泵开启后,通过变频器和调节阀将流量调到预定值后,试验用水进入分水斗,并通过分水斗的开槽溢流至本体。水流受重力影响在试验本体表面流动并形成水膜,经过两道围堰的再分配,流入上部收集水槽和下部收集水槽进行液位测量。试验用水采用市政用水并经过净化降低硬度,以保证水质标准符合原型安全壳冷却水指标要求。

试验需进行对应原型设计下的不同流量工况试验,流量通过变频器和调节阀共同调节,其中调节阀对流量进行粗调,变频器进行微调,流量调节精度可达 $\pm 0.1 \text{ m}^3/\text{h}$ 。流量达到稳定设定值需要一定时间,常规设计方法是直接将水引入分水斗,而无法保证水流量与原型设计完全一致,如图 3a 所示。为确保试验数据的有效性和结果的可信性,流量达到稳定后水才能流入试验本体。试验采用了在冷却水主管路流向试验本体分水斗旁增设一旁路(分水集水器),在流量未达到设定值前自动流回储水箱,如图 3b 所示。储水箱旁路和分水斗上方支路并联,并保证结构相同,阻力相同,这样通过阀门的互锁切换可实现流量的无扰切换。经在多个流量状态下反复调试,证明此方法可使系统在试验开始时即可迅速达到设定的冷却水流量,既满足了试验要求,又节约了试验成本,效果显著。

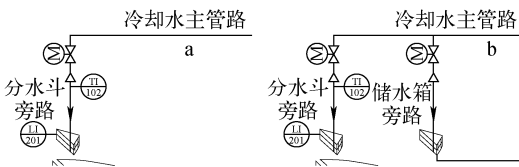


图 3 常规设计形式(a)与优化设计形式(b)对比
Fig. 3 Comparison of common (a) and optimum (b) designs

1.3 测控系统

采用包括变送器层、采集板层、控制与处理层在内的测控系统对流体总流量、流体和试验本体温度、分水斗和围堰及收集水箱液位、试验本体表面水膜厚度、试验本体表面水膜覆盖率和水膜经过起拱线处达到稳定的延迟时间等参

数进行测量。

水膜覆盖率是水分配试验的关键参数,它表征了水膜在安全壳表面分布的均匀情况。事故工况下,水膜的均匀分布可提高传热效率,带走更多的热量,而分布不均则会造成冷却效果显著下降,影响安全壳的可靠性。另一方面,水膜厚度也是试验需要测量的重要参数,水膜厚度的变化对传热的效果影响显著。

1) 视频测量系统

试验本体表面积超过 200 m^2 ,如何准确测量其表面水膜覆盖率,目前尚未有成熟可靠的经验供参考。通过测试性试验,确定采用视频测量系统,即通过工业 CCD 相机采集试验体表面的图像信息,再经过离线的机器视觉处理,计算得到试验体表面的水膜覆盖率。

PCS 水分配试验视频测量系统主要由数字 CCD 相机、高速图像采集系统、图像处理系统等模块构成,如图 4 所示。根据围堰系统将本体分割的区域及相机视场覆盖能力,试验本体分为 6 个目标区域,采用 6 台面阵 CCD 相机测量,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,计算并输出水膜覆盖率,延迟时间则可根据覆盖率变化间接得出^[2]。

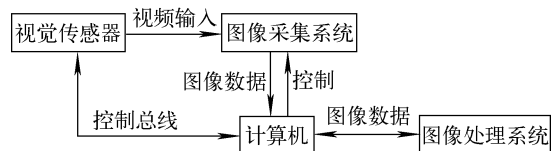


图 4 视频采集系统基本组成
Fig. 4 Basic composition of video acquisition system

鉴于试验现场水流分支多、外界光照变化复杂、试验条件不易控制等情况,且 6 台相机拍摄的图片尺寸大、数量多,实现本体表面干湿区的准确检测是一需解决的问题。考虑到检测方案是由静态相机捕获场景图像序列,并对图像数据进行连续存储,因此,在水膜覆盖率的检测中,将双线性插值方法和改进的 Canny 算子边缘检测算法相结合,这样既能准确检测出边缘信息,达到像素级的检测精度,又能提高系统的

抗干扰性能^[2]。图5为某次试验1号相机拍摄的原始图片与经过软件处理后的干湿区分布图片。由图5可看出,图像处理系统对干湿区边缘进行了有效的识别与判定。

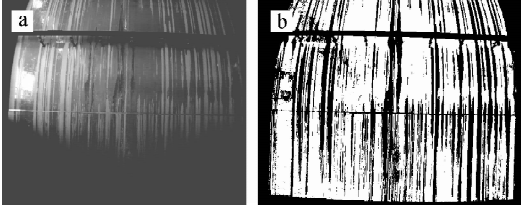


图5 1号相机视频图像处理前(a)、后(b)对比

Fig. 5 Comparison of original (a) and processed (b) images for No. 1 camera

为进一步佐证覆盖率计算结果的准确性,进行了视频系统的标定试验,试验方法为:将已知面积的深色布料覆盖在试验本体表面,用来代替水膜。布料数量依次增加,并通过相机分别拍摄图像,经过视频系统软件分析计算得到覆盖率数值,将此数值与理论计算(布料面积与拍摄区域安全壳面积之比)得到的结果进行对比,从而验证视频系统的准确率。图6为1号相机标定试验的图像处理前后对比。图7示出布料增加过程中程序计算覆盖率与理论有效覆盖率的对比结果。由图7可见,两者相对误差最大不超过3.5%,吻合较好。

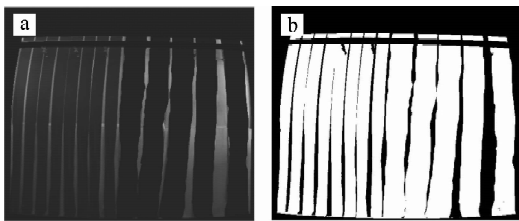


图6 1号相机视频标定试验图像处理前(a)、后(b)对比

Fig. 6 Image processing comparison before (a) and after (b) calibration test of No. 1 camera

2) 水膜厚度测量系统

水膜厚度是水分配试验中另一关键物理量,尤其在计算事故工况下的换热情况时,作为输入程序的重要参数,水膜厚度的变化对换热的效果影响很大。

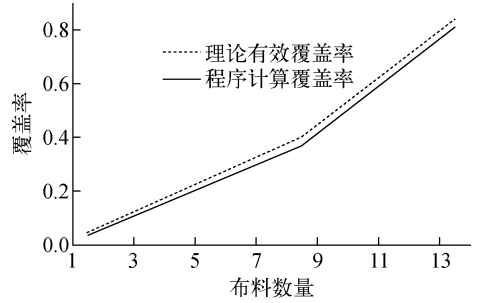


图7 1号相机视频采集系统标定结果对比
Fig. 7 Comparison between calibration results of video acquisition system of No. 1 camera

根据水膜厚度特征,其厚度一般介于0.1~1 mm之间^[3],考虑到水膜本身的波动特征,本试验选用米依公司生产的高精度电容式测微仪CS10,在不对水流进行扰动的情況下实现非接触式的高精度测量^[4]。

为进一步确认CS10的性能和精度,试验前对其进行了标定。选择无噪声震动且稳定的实验室,以高精度位移台作为检测设备,位移台精度高于0.1 μm ,远高于探针精度。将探针安装至位移台并调整至合适位置,按固定步长移动,记录探针测量示数,并与理论值进行比较,结果示于图8。由图8可见,理论值与测量值的最大误差为5 μm ,两者吻合良好。

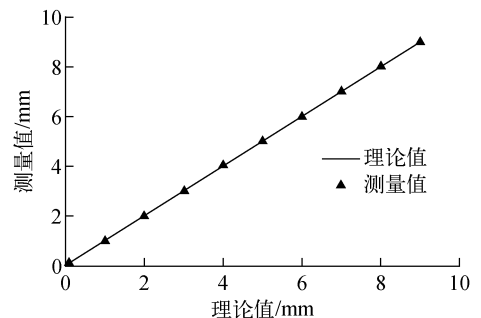


图8 水膜测厚系统的标定结果
Fig. 8 Calibration result of water film thickness measurement system

2 试验结果

2.1 覆盖率

近年来关于下降水膜的研究,多是基于平板对水膜厚度或统计学特征等方向的研究^[5],大多研究者选择蒸馏水作为试验工质,重点研

究水膜厚度以及不同平板倾角与雷诺数对水膜厚度的影响。本文以大功率原型安全壳为研究对象,开展了大空间曲率表面的水膜覆盖率研究。

根据水膜雷诺数定义:

$$Re = \frac{4\Gamma}{\mu}$$

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

结合安全壳表面特征,定义一特征长度 L , $\Gamma=Q/L$, Q 为质量流量。图 9 示出试验本体表面总覆盖率随雷诺数的变化。需要说明的是,水膜覆盖率与水流量及试验本体尺寸相关,在试验本体结构已定的情况下,开展了不同流量工况下的试验,试验本体为双曲率的椭球型壳体,在某中等水流量下,雷诺数沿水膜流动方向呈直线下降趋势,如图 10 所示。

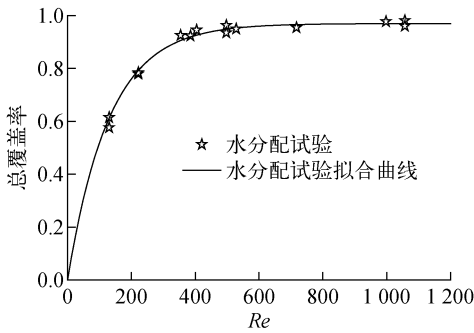


图 9 覆盖率随雷诺数的变化

Fig. 9 Change of coverage rate with Re

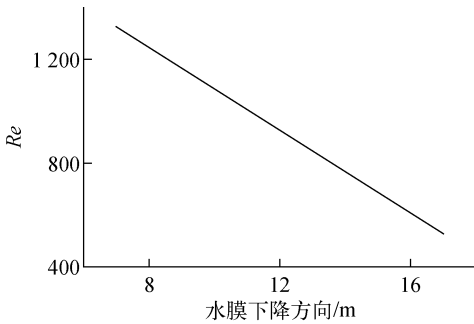


图 10 雷诺数沿水膜下降方向的变化

Fig. 10 Change of Re

along water film falling direction

流,相应于 Re 的范围为:1) 完全层流, $Re \leq 5.7$; 2) 第一过度机制, $5.7 \leq Re \leq 27$; 3) 稳态波动流, $27 \leq Re \leq 75$; 4) 第二过度机制, $75 \leq Re \leq 400$; 5) 紊流区, $Re \geq 400$ 。

结合 Ishigai 等对水膜的流动机制划分及本试验覆盖率变化特征可看出,当 $Re \leq 250$ 时,随雷诺数增加覆盖率急剧增加,在 $250 < Re \leq 400$ 区间,覆盖率增加进入缓慢上升期,在 $Re > 400$ 阶段,覆盖率增加甚微,基本呈水平直线发展趋势。即当水膜流动形态进入紊流时,覆盖率发展存在一临界拐点,水膜已在本体表面充分扩展,覆盖率基本不再变化。

2.2 延迟时间

延迟时间是从水流进入试验本体表面开始至其达到稳定为止的时间,以试验本体表面水膜开始形成为延迟时间起点,以覆盖率达到稳定为延迟时间终点。延迟时间对安全壳传热及内部峰值压力缓解有重要影响,是安全壳及其水分配系统设计必须要考虑的因素。

设定安全壳初始流量下理想安全时间为 τ ,各流量下实际延迟时间为 t ,则可对延迟时间进行无量纲化,得到相对延迟时间 $\tau' = t/\tau$ 。图 11 示出相对延迟时间随雷诺数的变化。

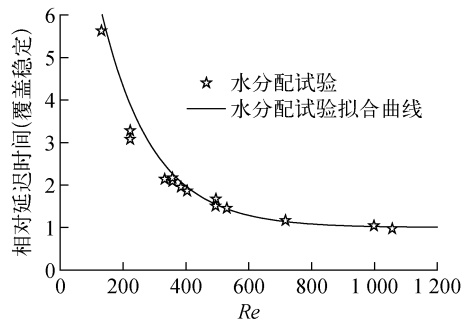


图 11 相对延迟时间随雷诺数的变化

Fig. 11 Change of relative quasi-steady time with Re

由图 11 可见,相对延迟时间呈下降抛物线趋势。形成这一现象的原因是随 Re 的增加,水流更快达到稳定状态,当 $Re \leq 400$ 时,相对延迟时间随 Re 增加快速下降,在 $400 < Re \leq 800$ 区间,相对延迟时间缓慢下降。不同于水膜进入紊流后覆盖率发展迅速达到临界拐点,相对延迟时间的拐点要晚得多,当 $Re > 800$ 时,相对延迟时间基本不再变化,其值接近于 1。

Ishigai 等^[6]基于对表面扰动的分析,对垂直水膜的流动进行了 5 种机制的划分。对于水

而形成此结果的原因,是由于水膜横向润湿了干区,使得接触角变小,缓慢增加了水膜覆盖区域。

3 结论

1) 针对大空间表面水膜覆盖率测量开发的视频测量系统稳定性好、精度高,测量与标定试验结果吻合一致;

2) 实现了水膜厚度的无扰实时测量,为进一步开展水膜动力学特征分析打下了基础;

3) 大空间曲率表面水膜覆盖率发展随 Re 的增加呈上升抛物线趋势,当 Re 增加至约 400 时,覆盖率上升进入临界拐点,此时水膜在本体表面充分扩展,覆盖率基本不再变化;

4) 相对延迟时间随 Re 的增加呈下降抛物线趋势,当 $Re > 800$ 时,相对延迟时间基本不再随 Re 的增加而变化。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 张子杨,鲁仰辉,王彦之,等. 基于视频技术的大空间液膜覆盖率的测量方法研究[J]. 中国科技成果,2013(9):56-59.

ZHANG Ziyang, LU Yanghui, WANG Yanzhi, et al. One measurement method for large surface water film coverage rage based on video technology [J]. China Science and Technology Achievements, 2013(9): 56-59(in Chinese).

- [3] ALEKSEENKO S V, NAKORYAKOV V E, POKUSAEV B G. Wave flow of liquid films [M]. FUKANO T ed. America: Begell House, 1994.

- [4] 张子杨,鲁仰辉,王欢,等. 大尺度试验本体表面液膜物理特性的综合测量[J]. 核动力工程, 2014,35(S1):37-39.

ZHANG Ziyang, LU Yanghui, WANG Huan, et al. Comprehensive measurement of physical properties of floating liquid film on large surface in test facility[J]. Nuclear Power Engineering, 2014, 35(S1): 37-39(in Chinese).

- [5] ZHOU D W, GAMBARYAN-ROISMAN T, STEPHAN R. Measurement of water falling film thickness to flat plate using confocal chromatic sensing technique[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2009, 33: 273-283.

- [6] ISHIGAI S, NAKANISI S, KOIZUMI T, et al. Hydrodynamics and heat transfer of vertical falling liquid films[J]. Bull JSME, 1972, 15: 594-602.