

池式快堆一回路系统冷却剂自然循环行为研究

程道喜, 张学锋, 杜开文, 翟伟明, 齐晓光, 周平, 于松, 马晓瑶, 李睿之
(中国原子能科学研究院 反应堆工程技术研究所, 北京 102413)

摘要:为进一步认识池式快堆事故余热导出工况下冷却剂自然循环行为,建立了可视化平板水模型模拟反应堆一回路系统主要部件来开展自然循环试验,获得了堆芯、钠池以及各热交换器出口和入口的温度响应和流场等数据。结果表明,在自然循环建立的最初阶段,堆芯出口温度受冷池的影响会有一个上升较慢的过程。试验中直接观测到了通过中间热交换器和堆芯组件盒间空间的自然循环流动。同时,热池内冷流体和堆芯出口热流体的相互作用,形成了热池内局部的冷却剂流动以及能够深入到组件内部的冷热交混作用;在堆芯出口较高温度流体和独立热交换器出口较冷流体的影响下,热池内形成了温度分层界面在堆芯出口高度附近的热分层。

关键词:池式快堆;自然循环;事故余热导出;热分层;温度脉动

中图分类号: TL333 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-6931(2024)09-1844-15

doi: [10.7538/yzk.2024.youxian.0305](https://doi.org/10.7538/yzk.2024.youxian.0305)

Research on Behavior of Natural Circulation of Coolant in Primary Circuit System of Pool Type Fast Reactor

CHENG Daoxi, ZHANG Xuefeng, DU Kaiwen, ZHAI Weiming, QI Xiaoguang,

ZHOU Ping, YU Song, MA Xiaoyao, LI Ruizhi

(Reactor Engineering Technology Research Institute, China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

Abstract: Thermal-hydraulic phenomenon of coolant in the primary circuit of pool type fast reactor under accident decay heat removal conditions is complicated because the layout of direct heat exchanger. In order to further understand the behavior natural circulation of coolant in primary circuit system of pool type fast reactor under accident decay heat removal conditions, a visual slab water model was established to simulate main component in primary circuit system and natural circulation experiments had been carried out on this model. Temperature response and flow field of coolant in core, pool and inlet and outlet of each heat exchanger were obtained. According to the transient temperature at the inlet and outlet of core assembly, in the initial stage of establish of natural circulation, the temperature at outlet remained relatively stable for a short period of time without increasing. After the temperature of cold pool rise, the temperature at outlet of core started to increase. So the cold pool has a significant impact on the temperature rise rate of short term natural circulation. In this experiment, the natural circulation flow in the intermediate heat exchanger and inter-wrapper space of core was observed. The higher temperature fluid from outlet of core floats directly to the top of hot pool and lower temperature fluid in the hot pool sinks, which forming a local circulation flow in hot pool. Due to

the intermediate heat exchanger loses its ability of heat transfer, the temperature of cold pool becomes higher and higher, with the development of natural circulation, and finally, temperatures of inlet and outlet of intermediate heat exchanger and cold pool are relatively close when the flow reaches to a stable state. Under influence of hot water from core and cold water from outlet of direct heat exchanger, a thermal stratification is formed and the position of interface of hot water and cold water is near top of the core. In this experiment, mixing of hot water and cold water is observed in the top of core, which forms significant temperature fluctuations, even in the place 20 mm below the outlet in the core assembly, this fluctuation still exists, indicating that the mixing effect can penetrate into the interior of the core assembly, which may cause a disadvantage to the establishing and maintaining of natural circulation through the core. All this result can enable us to fully understand the mechanism of natural circulation and provide support for the improvement of models in system analysis code.

Key words: pool type fast reactor; natural circulation; accident decay heat removal; thermal stratification; temperature fluctuation

事故工况下,依靠一回路系统冷却剂的自然循环带走堆芯余热是池式快堆关键固有安全性能之一。反应堆内冷却剂的自然循环是依靠冷却剂密度差形成的驱动压头来实现的流动循环,在池式快堆中,随着反应堆结构以及布置的不同,一回路系统内冷却剂自然循环建立的机制也不尽相同。目前,国际上针对事故余热导出系统的设计,主要分为4种形式^[1]:设置在中间热交换器二次侧或蒸汽发生器的IRACS(intermediate reactor auxiliary cooling system)、中间热交换器上设置余热导出管束的PRACS(primary reactor auxiliary cooling system)、事故余热交换器布置在钠池的DRACS(direct reactor auxiliary cooling system)和反应堆容器外壁辅助冷却的RVACS(reactor vessel auxiliary cooling system)。

在中国实验快堆^[2]等池式快堆中,事故余热的导出主要依靠布置在热池的独立热交换器以及二次中间回路和空冷器,属于DRACS方式。DRACS的布置给一回路系统内带来了更为复杂的热工水力现象,包括热分层、堆芯与热池的相互作用等。为了探明自然循环工况下,一回路系统内的主要热工水力现象,国际上开展了各类整体性或局部性的试验研究。DELTA装置试验^[3]是日本FBR池式快堆容器1:8水模型,相应开展了DRACS和PRACS的池式水模型试验,获得了瞬态过程中堆芯进出口温度等;采用DRACS的1:6的FBR回路式快堆模型^[4]水模型试验,比较了事故余热交换器采用浸没和穿透型两种布置的

堆芯进出口温度;JOYO快堆平面水模型试验^[5],验证了自然循环试验中相似性规律;通过1:20半圆柱(180°)水模型试验^[5],获得了不同功率对于加热器出口无量纲温度的影响;JSFR回路式快堆1:10水试验装置模拟了失去厂外电等5种事故工况,获得瞬态温度等数据^[3];CCTL-CFR钠试验^[6]研究了自然循环工况下,组件盒间的传热效应;Kamide等^[7]建立了PLANDTL-DHX钠试验模型开展回路式快堆的自然循环试验,结果表明盒间流对于堆芯冷却可起到较大的作用,能够有效降低堆芯出口峰值温度。Godom模型试验^[8]是基于超凤凰堆(SPX-2)热池1:5比例的90°水模型试验。试验观测到了冷的冷却剂从DHX流向腔室下部,再进入堆芯盒间;堆芯出来的热流体与冷水流在堆芯上部交混等关键现象;HIPPO模型试验^[9]是超凤凰堆(SPX-2)堆芯和热池区0.48倍比例的水模型试验,研究了组件间隙间流体流动对堆芯温度的影响;TANAGRA模型试验^[10]是超凤凰堆(SPX)热腔室的1:3比例的90°钠模型试验,研究了热池内自然循环并对水试验与数值模拟进行验证。JANUS模型试验^[11]是超级凤凰堆(SPX)的等比例缩比钠模型,用于探究自然循环流动方式,管道分层现象,同时验证以钠为工作流下的计算程序;为了充分认识钠池内热分层现象,Moriya等^[12-17]开展了热分层分离效应试验研究,获得了影响热分层的无量纲数以及温度分布变化规律等,试验工质包括了水、钠以及镓等。此外,各发展快堆的国家大多针对各自

堆型开展了整体性模拟试验,如德国 SNR-2 开展的 1:20 的 RAMONA^[18] 和 1:5 的 NEPTUN^[19] 整体水试验,印度 PFBR 开展的 1:4 的 SAMRAT^[20] 整体水试验,俄罗斯针对 BN1200 开展的 1:5 的 TISEY^[21] 水台架和 1:10 的 V-200^[22] 水台架试验,验证了反应堆自然循环的设计。

在现有研究中,无论是整体模型的水试验,还是钠介质试验,都只能从宏观参数上把握一回路系统内冷却剂的流动传热现象,对于自然循环工况,冷却剂具体的流动路径、关键位置的流场以及堆芯与上腔室相互作用时的冷却剂流动行为,现有的研究还不多,对于现象的认识还不够深入,对自然循环建立机制和过程的复杂过程的理解还不够透彻。自然循环工况下,整个一回路系统内冷却剂的流动及传热行为是相互联系、相互影响的,尤其是堆芯与钠池之间的相互作用,影响自然循环的建立。因此,有必要针对池式快堆自然循环工况下,一回路系统内冷却剂的流动行为开展深入研究。为此,本文通过建立透明平板水模型,利用可视化的方式观测得到自然循环工况下堆芯与热池内冷却剂的流动和温度变化,充分认识采用 DRACS 方式下池式快堆一回路系统内自然循环建立的过程中堆芯、钠池内冷却剂的流动传热行为以及相互作用,进一步明确自然循环建立机制,同时也为系统分析程序模型的改进提供支持。

1 试验装置及试验方法

试验模型以采用一回路布置事故余热交换器的池式快堆结构为基础,为了便于流场的可视化观测,设计成全透明平板水模型。由于自然循环工况下冷却剂主流方向为堆芯朝向各独立热交换器以及中间热交换器方向,并会有部分冷却剂经过中间热交换器进入冷池进而回到堆芯入口。因此试验中主要模拟独立热交换器和中间热交换器与堆芯入口、出口对应区域内的冷却剂流动。

试验系统主要流程如图 1 所示。整个试验系统包括平板模型、二次冷却水系统、补水系统及试验测量仪器仪表等。

1.1 平板水模型

为能够直接观测冷却剂的流动,试验基于平板水模型开展。水与钠的导热系数存在较大差异,对于传热的影响主要体现在冷却剂和加热/冷

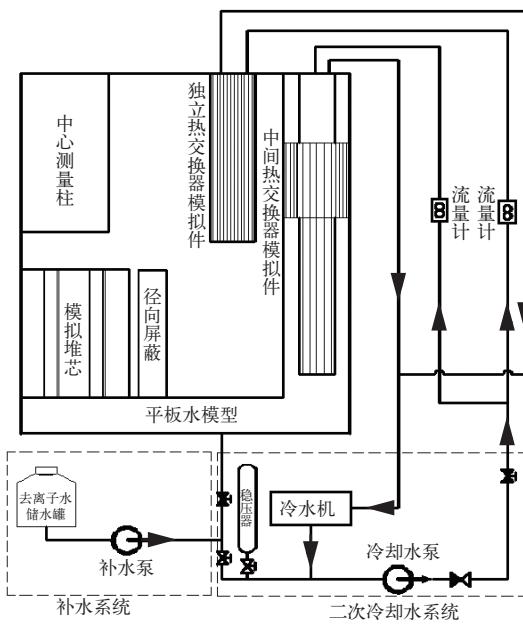


图 1 平板水模型试验系统流程图

Fig. 1 Flow chart of slab water model experiment system

却壁面的换热热阻以及冷却剂内部的导热作用上。冷却剂内部的导热作用导致的冷却剂内部的能量迁移远小于对流作用在堆芯、各换热器产生的能量交换,只有在极低的加热功率下才会有明显差异^[5]。对于冷却剂与壁面的换热热阻的差异,会导致壁面与冷却剂的温差相对于反应堆来说偏大,对于自然循环这种慢速的过程,不会对冷却剂的能量分布产生较大的影响^[23],因此本试验中,主要确保冷却剂带走的总热量与反应堆满足相似。目前,国际上采用水开展整体性的模拟试验是通行做法,主要采用的无量纲数^[17-19]相同,主要包括理查森数 Ri 、雷诺数 Re 、贝克莱数 Pe 、欧拉数 Eu 和能量准则数 N 等,具体如下:

$$Ri = g\beta\Delta T / u^2 \quad (1)$$

$$Re = ud/\nu \quad (2)$$

$$Pe = \rho cul/\lambda \quad (3)$$

$$Eu = \Delta p / \rho u^2 \quad (4)$$

$$N = Q / \rho cul^2 \Delta T \quad (5)$$

其中: g 为重力加速度; β 为工质体积膨胀系数; ΔT 为温度差; l 为特征长度; u 为速度; d 为特征直 径; ν 为运动黏度; ρ 为工质密度; c 为工质比热; λ 为工质导热系数; Δp 为压降; Q 为功率。

理查森数表征浮升力与惯性力的比值,能量准则数表征了堆芯或换热器功率与流体带走或释放的能量的比值,欧拉数即为流动阻力,这些都是

影响自然循环流动的关键无量纲数,在试验中需要重点满足。由于缩比和工质物性差异的影响,在满足式(1)、(4)、(5)相似的情况下,雷诺数和贝克莱数无法满足相似。国际上已有研究^[5,17-19]表明,只有在功率极低的情况下贝克莱数的差异才会形成影响,雷诺数的差异影响主要体现在阻力系数的模拟,可通过阻力件的方式进行阻力修正。

考虑到试验成本和试验功率条件以及水试验情况下加热元件的功率密度上限,本试验选取的模型比例为1:8。在该比例下,模型中雷诺数较原型小两个量级,贝克莱数高1个量级。堆本体

内堆芯、各热交换器等的相对高度按照比例严格保证。平板模型主体部分的尺寸约为1574 mm(高度)×947 mm(长度)×250 mm(宽度)。简化起见,平板模型内部忽略了很多实际反应堆中的结构部件柱状屏蔽等。平板水模型主要结构如图2所示。模型中包括模拟堆芯(内部包括发热模拟组件和不发热模拟组件)、中心测量柱模拟件、径向屏蔽模拟件、中间热交换器模拟件、独立热交换器模拟件、有机玻璃筒体、联箱模拟件筒体以及各类支撑结构等。模型中,堆芯、中间热交换器和独立热交换器的相对高度满足统一的模型比例。

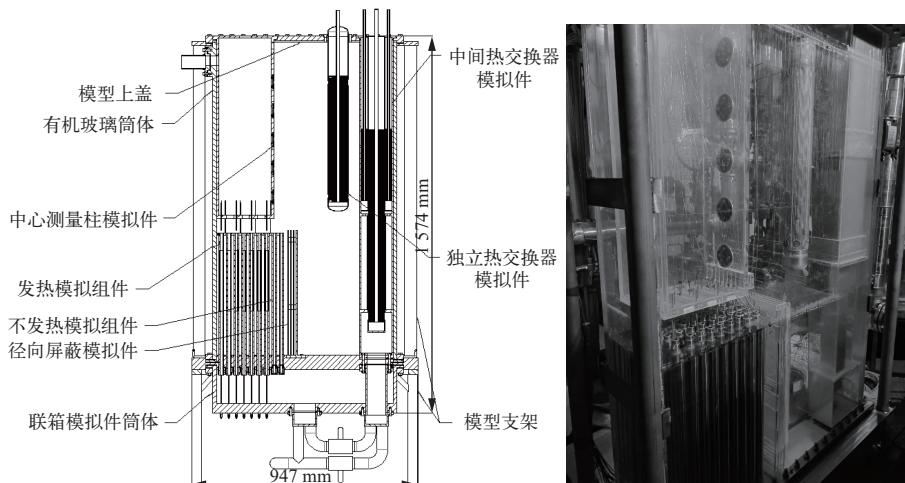


图2 平板水模型结构示意图及实物照片
Fig. 2 Diagrams of structure and photo of slab water model

1) 模拟堆芯

根据反应堆原型堆芯结构尺寸可确定模拟堆芯结构尺寸约为511 mm(高度)×294 mm(长度)×170 mm(宽度),模拟堆芯结构如图3所示。模拟堆芯由45根模拟组件组成,其中图3中1~7列共35根为发热模拟组件,8、9列为不发热模拟组件。由于水的导热系数较反应堆冷却剂钠的导热系数低两个量级,不能较好模拟热量通过组件盒壁传递给组件盒间冷却剂的过程。因此,在组件盒壁单独设置加热器,补偿该部分热量,但每盒组件总功率不变。盒壁加热器利用铠装加热丝缠绕在同心圆管形成的环隙并填充熔融金属制成^[24],最终盒壁加热器截面为图3中的圆环形状,试验中可自由调节盒壁加热器功率。模型模拟堆芯单支模拟组件设计功率为315 W,电压为220 V,单支电阻为154 Ω,相对于铜导线,加热元件的电

阻远大于导线电阻(本装置接线情况下,导线电阻约为0.37 Ω)。本文中单相自然循环的情况下,整个瞬态过程变化缓慢,可视为准稳态。由于电加热元件自身热容相对于整个模型内水工质来说很小,因此,在不考虑散热影响的情况下,可认为冷却剂带走的热量与测量得到的电功率相等。

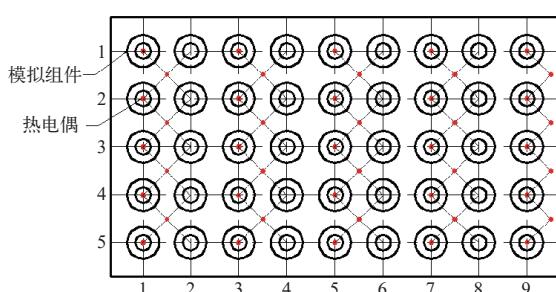


图3 模拟堆芯结构示意图
Fig. 3 Diagram of core structure of model

由于反应堆内工质处于单相的状态,模拟堆芯设计时需要同样保持单相的状态,加热壁面温度不能过高而产生汽泡。根据文献[25]中对于竖圆柱自然对流换热关系式可计算得到在堆芯加热功率为10 kW、水温为30 °C时,加热壁面温度为56.4 °C,远低于大气压下水的饱和温度,因此试验中不会出现两相的工况,模拟堆芯释热能够被单相的冷却剂带走。

2) 独立热交换器(DHX)

独立热交换器模拟件最大设计换热功率为10 kW。根据反应堆原型结构尺寸以及模型比例,DHX外径为85 mm,一次侧出口和入口的距离为475 mm。共布置换热管453根,换热管尺寸为 $\phi 3 \text{ mm} \times 0.3 \text{ mm}$ 。

3) 堆芯围筒模拟件

堆芯围筒模拟件下部周向开孔是经过独立热交换器冷却后的冷流体进入堆芯组件盒外间隙空间的重要路径,在试验模型中也进行了模拟。

1.2 试验回路系统

试验回路系统主要包括二次水冷却系统、补水系统等,二次水冷却系统主要为平板水模型的独立热交换器提供二次侧冷却水,是整个试验系统的热阱。该系统包括二次水循环泵、冷水机以及各类手动阀门、管道等。DHX一次侧热量传递到二次侧后,通过冷水机制冷将热量散至空气中。冷水机出水温度最低为5 °C,工作区间为设定温度 ± 1 °C,因此,冷水机出口水温不是恒定值,有一个波动区间。

1.3 试验测量

1) 试验中参数范围

试验中主要的温度、流量、堆芯加热功率以及无量纲参数范围列于表1。无量纲参数计算时,高度特征直径选取为堆芯与DHX的中心距,直径为组件盒内直径,温差为堆芯出口和入口的温差,流速为组件盒内流速。

2) 试验模型温度测量

为详细监测平板水模型内热工水力过程,设置的温度测点位置如图4所示。平板水模型中热电偶数量共103副,图中发热组件出口及其间隙空间出口的温度传感器通过中心测量柱上的引出管向上引出模型,此类热电偶共计45副。堆芯温度测点布置如图3所示,布置与组件盒内部加热

表1 试验中主要参数范围

Table 1 Range of main parameters in experiment

参数	数值范围
模型内温度, °C	20~60
DHX 二次侧管路温度, °C	10~25
DHX 二次侧流量, m ³ /h	0.266~1.2
堆芯功率, kW	0~10
Ri	0.63~17.1
Pe	$1.53 \times 10^5 \sim 4.86 \times 10^5$
Re	370~1 653

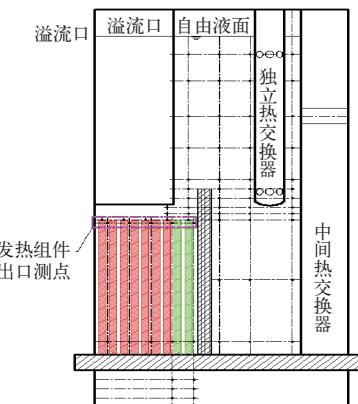


图4 模型内温度测点布置

Fig. 4 Layout of temperature measurement points in model

区出口上部的热电偶,为避免出口交混的影响,这部分热电偶在出口平面下约20 mm。布置于组件之间空间的热电偶,该类热电偶同样布置在出口平面下20 mm处。堆芯出口交混区流体温度测量热电偶,在轴向高度上,该类热电偶布置在堆芯组件出口平面以上30 mm处。热池内的温度传感器通过在有机玻璃筒体壁上开孔横向插入到模型中心位置。试验模型温度测量采用T型热电偶,量程为0~120 °C。经过实温标定后,热电偶精度可达 ± 0.15 °C,响应时间为10 ms,热电偶冷端利用冰水混合物进行补偿,确保温度测量精度。试验回路管道内流体温度测量采用PT100铂热电阻温度变送器,精度为 ± 0.15 °C。

3) 模型流场测量

针对试验模型中关键位置冷却剂流动的速度场的测量,在本试验中采用粒子成像系统(PIV)来进行观测。该系统^[26]由光源系统(激光器、片光源镜头组、导光臂)、图像采集系统(跨帧CCD相机、专用高速图像数据采集板)、控制协调系统(同步控制单元)、示踪粒子(PIV专用颗粒)、专

用PIV图像数据处理和流场显示系统等组成,其基本原理主要是利用双脉冲片状激光束照射在流域内示踪粒子上,并用高速、高清摄像机捕捉粒子进行成像,记录比较短时间内粒子位置的变化,计算得到该处流体流动的方向以及大小,形成速度矢量场结果。本试验中采用的PIV可以拍摄的

图像范围为135 mm×135 mm的矩形范围,每秒可拍摄10组图像用于流场数据分析。

4) 其他参数测量

各热交换器二次冷却水流量采用浮球式流量计,电加热元件电流电压分别采用电流、电压传感器进行测量,具体测量范围和精度列于表2。

表2 试验测量仪表量程及精度

Table 2 Range and accuracy of instrument in experiment

参数	仪表类型	量程	精度
模型内温度	T型热电偶	0~120 °C	±0.15 °C(试验温度标定后)
DHX 二次侧管路温度	Pt100 热电阻	0~120 °C	±0.15 °C
DHX 二次侧流量	浮球式流量计	0~0.44 m ³ /h, 0~1.73 m ³ /h	±1%
电加热元件电流	电流测量模块	0~10 A	±1%
电加热元件电压	电流测量模块	0~220 V	±1%

1.4 试验方法

试验时,首先将试验系统注入去离子水,并在整个模型内形成基本等温的初始状态,然后开启电加热器,并同时开启独立热交换器二次侧冷却回路和冷水机,观测试验模型内自然循环建立直至稳定的过程中,各关键位置的温度瞬态响应以及流动情况。

试验时模拟堆芯电加热功率为2 480 W,独立热交换器二次侧冷却水流量为0.266 m³/h,冷水机设定温度为10 °C时,堆芯组件盒内、外出口和入口的冷却剂温度和温差的瞬态变化情况。试验中先开启数据采集系统后约135 s开启电加热器,因此试验开始时刻为135 s。

2 堆芯区域冷却剂自然循环流动

2.1 堆芯冷却剂温度响应

图5为堆芯组件盒内和盒外出口和入口的温度瞬态变化。从图5可知,在初始模型内各处接近于等温静止的状态下,启动电加热后,组件盒内出口冷却剂有一个较快速度的跃升,这是由于在电加热启动时刻,流体处于静止状态,尚未形成流动,因此流体温度上升较快;随着温度的升高,组件内部冷却剂密度降低,在浮力的作用下开始逐步形成自然循环流动,在200 s左右形成第1个温度峰值,温度约为23.9 °C,即堆芯出口温度在60 s左右的时间内上升了4 °C。在达到第1个峰值后,组件盒内出口温度变化不大,直至约475 s温

度又开始逐步上升。在200~475 s,约275 s的时间内,堆芯组件盒内出口冷却剂温度上升了约0.2 °C。值得注意的是,堆芯组件入口的温度也在这一时刻开始上升。因此,堆芯出口温度出现一个短暂缓慢增长的平台期的主要原因是:在自然循环建立的较早时期,组件内原有冷流体经过加热后形成的热流体需要经过一段时间才能经过中间热交换器IHX并到达冷池,并最终引起堆芯入口温度的变化。由于中间热交换器没有排热能力,随着流入冷池的热流体的逐渐增多,冷池升温速率开始逐渐增大,堆芯入口温度上升,为了继续建立并维持自然循环带走热量,堆芯出口温度需要随之上升以满足自然循环驱动所需要的温差。中间热交换器出、入口温度的变化(图6)就充分反映了热流体的这一流动过程。从该过程可看出,在池式快堆中,最初较短时间内自然循环建立的过程中,堆芯出口冷却剂温度的升温速率与组件出口热流体引起冷池、堆芯入口等位置冷却剂温度变化的速率有关,即冷池容量越大,冷却剂温度越低,越能够保证堆芯出口温度不会在自然循环建立的最初阶段急剧升高,反应堆依靠冷池较冷的冷却剂来吸纳堆芯产生的热量。这一特性体现了池式快堆在事故余热导出方面所具有的固有安全性能,在不需要任何设备或系统动作的前提下,自动实现早期阶段堆芯余热的导出。

值得注意的是,经过第1阶段的上升以及到达平台期之后,堆芯出口温度开始出现一定幅度

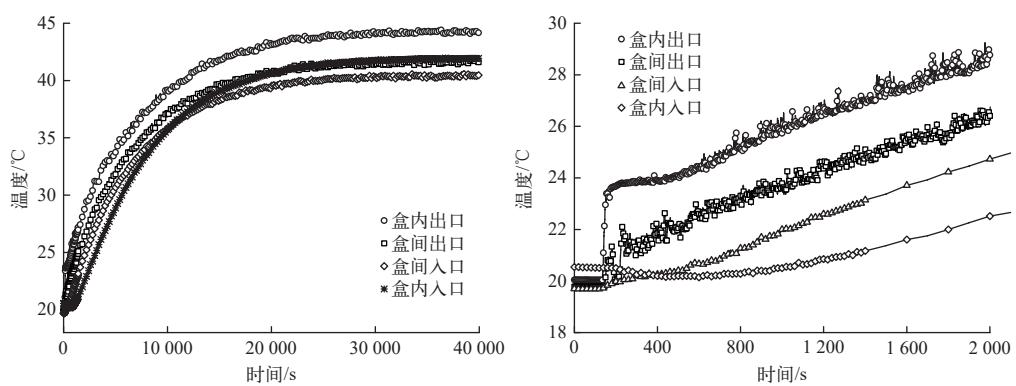


图 5 堆芯组件盒内和盒外入口、出口温度瞬态变化

Fig. 5 Transient temperature at inlet and outlet of inner and inter-wrapper space of core assembly

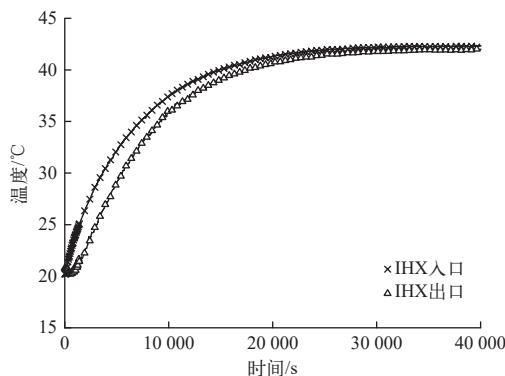


图 6 中间热交换器入口和出口冷却剂温度瞬态变化

Fig. 6 Transient coolant temperatures at inlet and outlet of IHX

的脉动，并且随着温度的不断升高，脉动幅度逐步增大。与此同时，堆芯盒内入口温度却未出现脉动，或者脉动很小，入口温度曲线较为平滑。造成温度脉动的原因主要有自然循环逐步建立后，随着流动的逐渐发展，自然循环进入湍流状态，湍流脉动引起温度脉动。同时，由于组件盒内出口温度较高，堆芯出口周围热池冷却剂温度相对较低，在自然循环工况下，由于交混的不充分，冷热流体的交汇将会形成温度脉动。由于本试验模型中，堆芯组件盒内出口温度测量传感器布置在深入组件内的位置，脉动造成的影响有限，但对于堆芯组件上部交混区域的温度测点，其所监测得到的温度波动幅度较大。

随着冷池内冷却剂温度的上升，堆芯入口温度也随之逐步上升，堆芯出口温度重新开始逐渐提升，堆芯组件盒内入口和出口的温差进一步增加，在约 2 000 s 左右时，堆芯组件盒内出和入口的温差到达最大，由第 1 个峰值 4 °C 的温差，升高

到了约 7.5 °C 的温差。之后，虽然堆芯组件盒内入、出口冷却剂温度均在继续上升，但温差在逐步缩小。堆芯出口流体温度升高，引起热池温度的不断上升，独立热交换器一次测温度不断升高，其带走的热量逐渐增大，当堆芯电加热功率与独立热交换器带走的热量以及模型向环境的散热达到平衡后，堆芯组件盒内入口和出口的冷却剂温度达到稳定。约 30 000 s 之后温度不再继续上升，盒内出口最高平均温度为 44.3 °C，盒内入口最高温度为 41.9 °C，堆芯组件盒内出口与入口的冷却剂温差维持在均值为 2.4 °C 的波动状态。

堆芯组件盒间冷却剂温度同样在电加热开启后也开始逐步上升，盒间空间堆芯出口位置(简称盒间出口)冷却剂温度并没有类似于组件盒内出口那样快速上升到第 1 个平台的过程，而是处于稳步上升的状态。盒间冷却剂出口和入口的温差在 640 s 左右时达到最大值，约为 2.3 °C，之后虽然盒间空间入口和出口的温度均在上升，但温差在逐步缩小，在 10 000 s 之后温差维持在均值为 1.2 °C 的波动状态。最终盒间流出口平均温度达到 41.7 °C，入口平均温度达到 40.5 °C。

根据试验参数可计算得到整个过程中理查森数最高为 17.1，在自然循环稳定后，维持在 0.83。贝克莱数最高为 4.86×10^5 ，自然循环稳定后维持在 4.4×10^5 ，雷诺数最高为 1653，稳定后维持在 1507。从无量纲数的变化范围可知，在自然循环建立的过程中，由于温差较大、流速较低，对应理查森数较大，此时自然循环驱动力较大，能够较快建立自然循环；在自然循环稳定后，温差相对降低，自然循环流速较大，理查森数相对于自然循环建立阶段较小。反应堆原型中贝克莱数在 10^4 量级，说

明在能量交换中, 对流的作用远大于导热, 由导热引起的能量交换远小于对流换热作用, 贝克莱数差异可忽略。试验中雷诺数都在 2 000 以下, 属于层流; 反应堆中雷诺数高两个量级, 因此反应堆内自然循环流动仍处于湍流的范围。

2.2 堆芯冷却剂流动

利用 PIV 对堆芯内冷却剂的流动进行了观测, 由于模型区域较大, PIV 每次探测的视窗大小有限, 因此, 对于模型内冷却剂的流场测量采取分区域拍摄的方式获取关键位置冷却剂的流动情况。

堆芯区域选取的观测位置如图 7 所示。红色阴影代表电加热组件, 绿色阴影代表非发热组件, 图中 x 和 z 方向分别与后续流场试验结果中的 x 和 z 方向相对应。位置 1 分别用于测量堆芯流向热池的出口流体的运动, 位置 2 用于测量堆芯组件出口流体的流动情况, 位置 3 用于测量组件盒间流的流动情况。

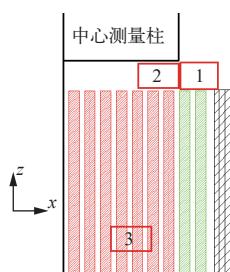


图 7 堆芯附近流场测量位置

Fig. 7 Measuring position of flow field beside core

1) 堆芯流向热池出口位置流场

图 8 为堆芯区域位置 1 处测量得到的冷却剂流场。由于堆芯顶部中心测量柱对于堆芯出口向

上浮流动的影响, 在堆芯区域进入热池的位置, 流体流动方向具有沿着中心测量柱底部, 以一定的横向速度向热池运动, 当进入到中心测量柱边缘后, 流体向上的速度有所增加, 在出口处, 自然循环流动 z 坐标方向上速度最高约为 0.025 m/s。

伴随着堆芯出口主流从堆芯外围和向上的运动, 在主流周围还出现了一定的反向流动, 图 8 中主流的周围均存在大量的“蓝色区域”, 代表存在着反向的流动, 尤其是在 z 方向上, 在堆芯出口主流上下侧都有向下运动的流体。说明一方面堆芯冷却剂受热上浮流出堆芯; 另一方面周围热池的流体会向内进行反向补充。堆芯出口附近存在的这种流体反向流动将可能引起堆芯出口区域不同温度冷却剂的交混, 从而引发堆芯出口温度测量得到的温度值存在脉动。

2) 堆芯出口位置流场

堆芯出口位置 2 处的流场及 x 和 z 方向的速度云图如图 9 所示。组件出口流速较高, 向上的流速能够达到 0.03 m/s, 较其他位置的速度大。从图 9 可看出, 组件盒内出口和盒间出口冷却剂的流动方向以及两者的交混。在堆芯出口上部中心测量柱结构的作用下, 堆芯出口流体无法直接向上运动, 需通过横向绕过中心测量柱后才能进入热池。因此堆芯出口流体在交混前, 流体轴向上的速度较大; 而经过向上运动交混后, 轴向上速度有所降低, 横向速度增大, 向堆芯外围运动。

同样, 从图 9 还可看出, 在堆芯出口主流周围还充斥着向下运动的流体, 尤其是在图 9b 所体现的 z 方向速度云图中, 大量“蓝色”区域代表着这些区域内存在着速度向下运动的流体。这进一步表

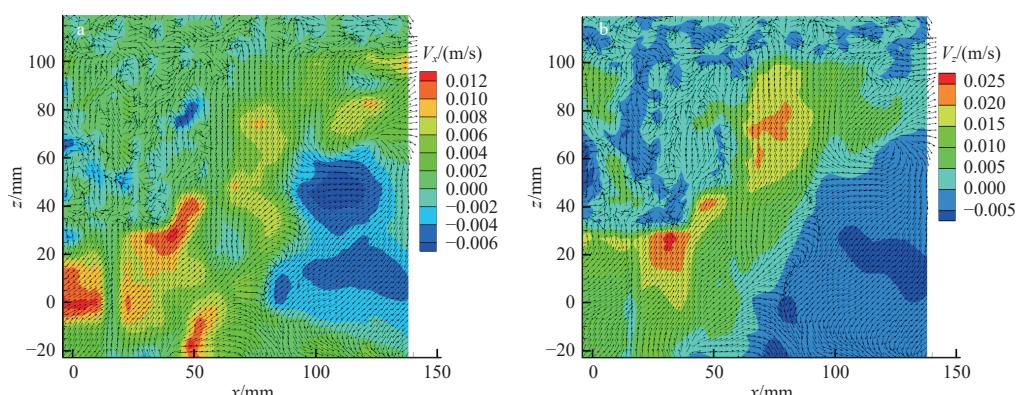
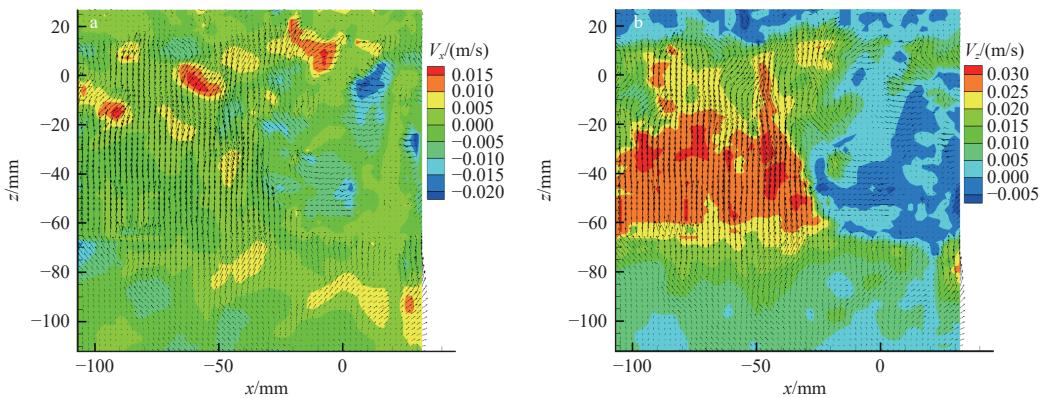


图 8 堆芯向热池出口位置 1 处冷却剂流场及 x 方向(a)和 z 方向(b)速度云图

Fig. 8 Flow field and velocity contour in x direction (a) and z direction (b) at position 1

图 9 堆芯向热池出口位置 2 处冷却剂流场及 x 方向(a)和 z 方向(b)速度云图Fig. 9 Flow fields and velocity contours in x direction (a) and z direction(b) at position 2

明,堆芯出口区域热流体上升之后,周围立即会有冷流体补充。在冷流体的作用下,热流体流动受到挤压,堆芯出口的热流体的横向截面面积减小。

3) 堆芯组件盒间流体流动

组件盒间(位置 3 处)的流动矢量方向及速度分量的云图如图 10 所示。独立热交换器出口较冷的流体通过堆芯围筒底部开孔进入堆芯组件盒间空间后,在盒壁传递的热量的作用下,从堆芯外周向堆芯中心做横向运动,图 10 中,横坐标 $-x$ 方向为朝向堆芯中心方向, $+x$ 方向为朝向堆芯外周方向。在下部区域,盒间流的 x 方向的速度以负值为主,说明流体在下部向 x 方向运动,即向堆芯中心位置流动;盒间流受到加热后上浮,需要向上通过堆芯出口从堆芯中心向堆芯外周运动,因此在上部区域,盒间流 x 方向的速度又变为正。 z 方向速度一直为正值,说明盒间流在轴向上一直处于向上运动的状态。这就表明,经过堆芯围筒底部开孔进入堆芯盒间的冷流体首先在堆芯盒壁热

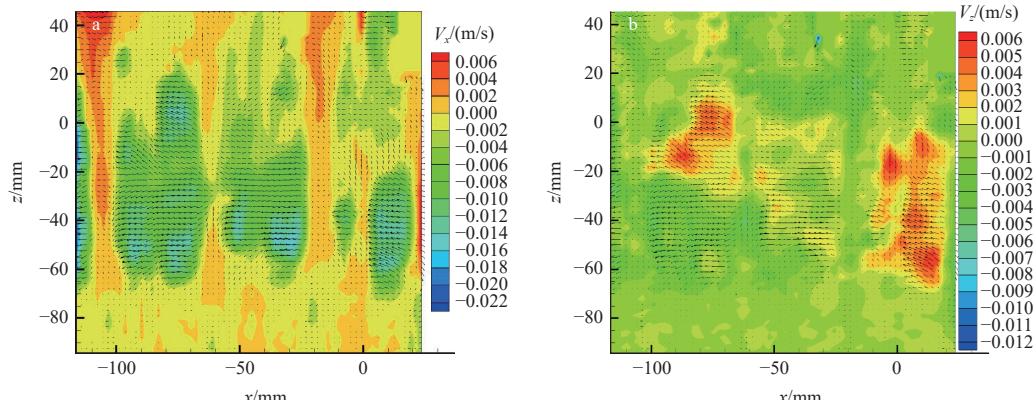
量的作用下,向堆芯中心靠拢;随后吸收组件盒壁传递的热量后,受热膨胀向上浮升,由于中心测量柱的作用,无法直接向上运动,需进一步转向堆芯外侧方向。在整个过程中,轴向上冷却剂流动始终是向上的。本文研究工作通过直接观测的方式,确认了盒间流动的存在以及盒间流的主要运动方向和形式。

3 中间热交换器和独立热交换器冷却剂自然循环行为

3.1 各热交换器出口和入口的冷却剂温度响应

中间热交换器和独立热交换器入口和出口的冷却剂温度如图 11 所示。在试验中热池上部整体温度差不大的情况下,中间热交换器入口和独立热交换器入口温度差别较小,在图中基本接近于重合。

根据中间热交换器出口和入口的冷却剂温度的瞬态变化可知,入口冷却剂温度的升高先于出

图 10 堆芯向热池出口位置 3 处冷却剂流场及 x 方向(a)和 z 方向(b)速度云图Fig. 10 Flow fields and velocity contours in x direction (a) and z direction(b) at position 3

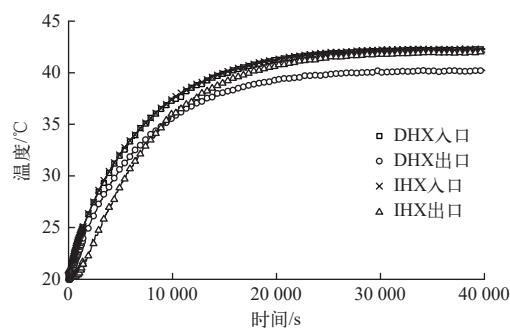


图 11 中间热交换器和独立热交换器出口和入口的冷却剂温度瞬态变化

Fig. 11 Transient coolant temperatures at inlet and outlet of IHX and DHX

口的,形成最初阶段的温差。在全厂断电以及蒸汽发生器失去给水等事故工况下,反应堆二回路失去排热能力,中间热交换器逐步失去热阱作用后,在自然循环的建立中,只能起到连通冷池和热池的冷却剂通道的作用。随着热池内热流体不断通过中间热交换器通道进入冷池,中间热交换器出口和入口的温差逐渐消失甚至是热池上部和冷池以及堆芯组件入口温度相同,此时仍存在通过盒内的自然循环流动,说明此时热池充当了盒内自然循环的热阱。

独立热交换器出口和入口的冷却剂温度在初始时相等,在独立热交换器二次侧投入运行后,二次侧入口冷却水在冷水机的作用下,温度逐步下降至设定温度,类似于实际反应堆中,空冷器风门打开后,独立热交换器二次侧中间钠回路自然循环逐步建立,形成冷却能力。此时,独立热交换器开始具备排热能力,其一次侧出口和入口的冷却剂温差开始逐渐变大,同时随着自然循环的逐步建立,自然循环流量增大,整体排热能力逐步增强,到最后与堆芯加热功率以及模型整体散热功率相匹配,整个试验模型内各处温度达到平衡。

图 12 为独立热交换器二次侧出口和入口的温度以及根据流量温差计算得到的热平衡排热功率。在堆芯功率 2 480 W 时,独立热交换器二次侧排热功率为 2 400 W,约占电功率的 96.7%。这是由于为了进行流场观测,模型采用透明有机玻璃制造,未进行保温。因此有一定比例的热量通过模型腔室壁面向环境散热。由于试验的整体温度较低,与环境温度差别较小,且有机玻璃的导热系数较低,具有一定的隔热效果,因此在本试验

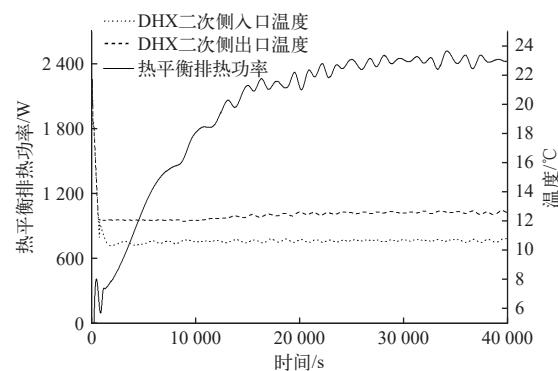


图 12 独立热交换器二次侧温度及热平衡排热功率

Fig. 12 Temperature and heat removal power calculated by heat equilibrium method at secondary side of DHX

中,散热量不大。

3.2 各热交换器内冷却剂的流动

1) 中间热交换器冷却剂流动

图 13 为中间热交换器流道内冷却剂的矢量场和 x 、 z 方向的速度云图。中间热交换器内布置大量的金属管束,无法对其内部的流动进行测量,图中为管束与壳体之间的间隙位置,可看到,在中间热交换器内部存在着 z 方向的冷却剂流动,速度在 1 mm/s 左右。通过直接观测,确认了即使在中间热交换器失去热阱的情况下,也有冷却剂通过。即通过中间热交换器的盒内流道是存在的。

2) 独立热交换器出口冷却剂流动

独立热交换器出口冷却剂流动如图 14 所示。流体经过冷却后以较大速度,即 x 方向速度从独立热交换器出口流出,由于温度较热池较低,密度较大,在从独立热交换器出口流出后随即开始下沉,横向运动的距离较小,且流体的流动形态呈现出典型的羽流形状。而出口附近热池其他区域,流动很小。试验中,通过可视化观测,独立热交换器出口流体最终流入热池底部,在下沉的过程中,扩散的范围较小,主要以向下流动为主,不会向堆芯上部运动。独立热交换器出口流体流速较大,能够达到 cm/s 量级,说明形成的盒间流的流量较大。

4 热池内冷却剂的流动及传热行为

4.1 热池内温度随时间的变化

图 15 为堆芯围筒外侧的热池在轴向高度上的温度分布随时间的变化。在试验开始时,系统

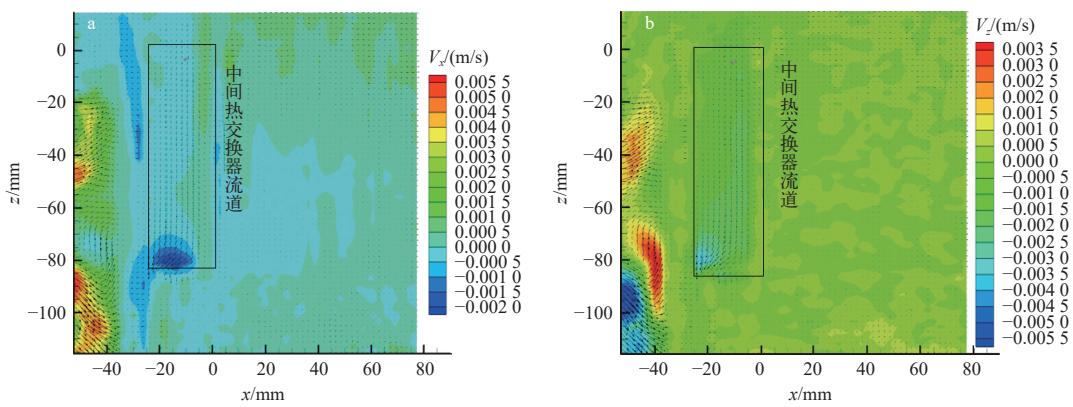
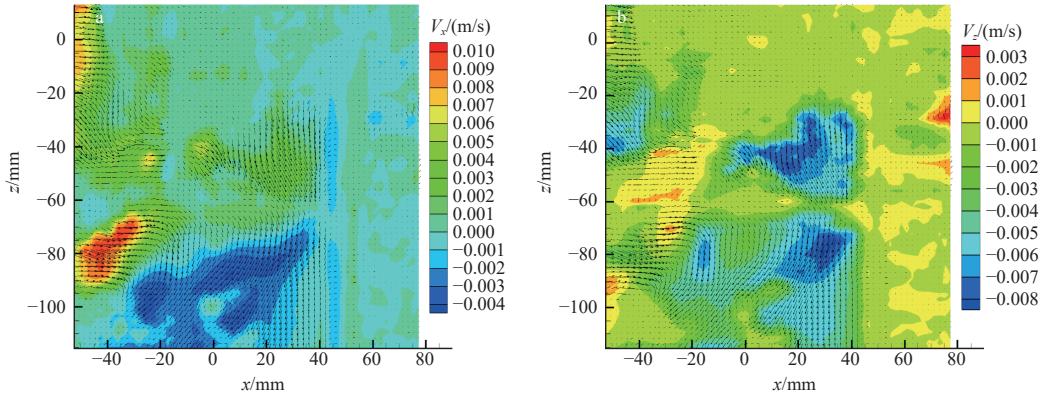
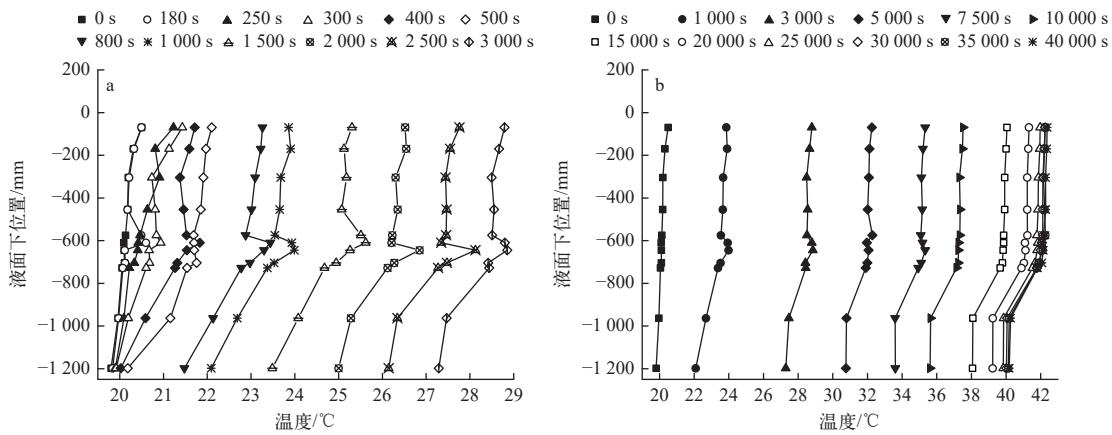
图 13 通过中间热交换器内流动流场以及 x 方向速度(a)和 z 方向速度(b)Fig. 13 Flow field and x direction (a) and z direction (b) velocities in IHX图 14 独立热交换器出口流动流场以及 x 方向速度(a)和 z 方向速度(b)Fig. 14 Flow field and x direction and z direction velocities at outlet of DHX

图 15 0~3 000 s(a)和0~40 000 s(b)堆芯围筒外侧热池轴向温度分布

Fig. 15 Axial temperature distributions of hot pool outside core shroud during 0~3 000 s (a) and 0~40 000 s (b)

内轴向冷却剂温度基本处于一致的状态,热池顶部温度略高,但轴向高度上温差不大。

瞬态试验开始后,开启堆芯加热,较热的冷却剂从进入堆芯上部与中心测量柱底部空间交混,由于堆芯顶部中心测量柱的存在,经过堆芯加热的流体不能直接上浮,需要横向穿过中心测量柱

底部后,在具有一定横向速度的情况下向热池空间运动;由于最初阶段热池整体温度还较低,在堆芯出口流体到达的位置温度会显著升高。因此,受到堆芯出口横向热流体的影响,热池轴向温度分布在对应于堆芯出口高度处有明显的升温。

不同时刻热池内温度分布如图 16 所示。可

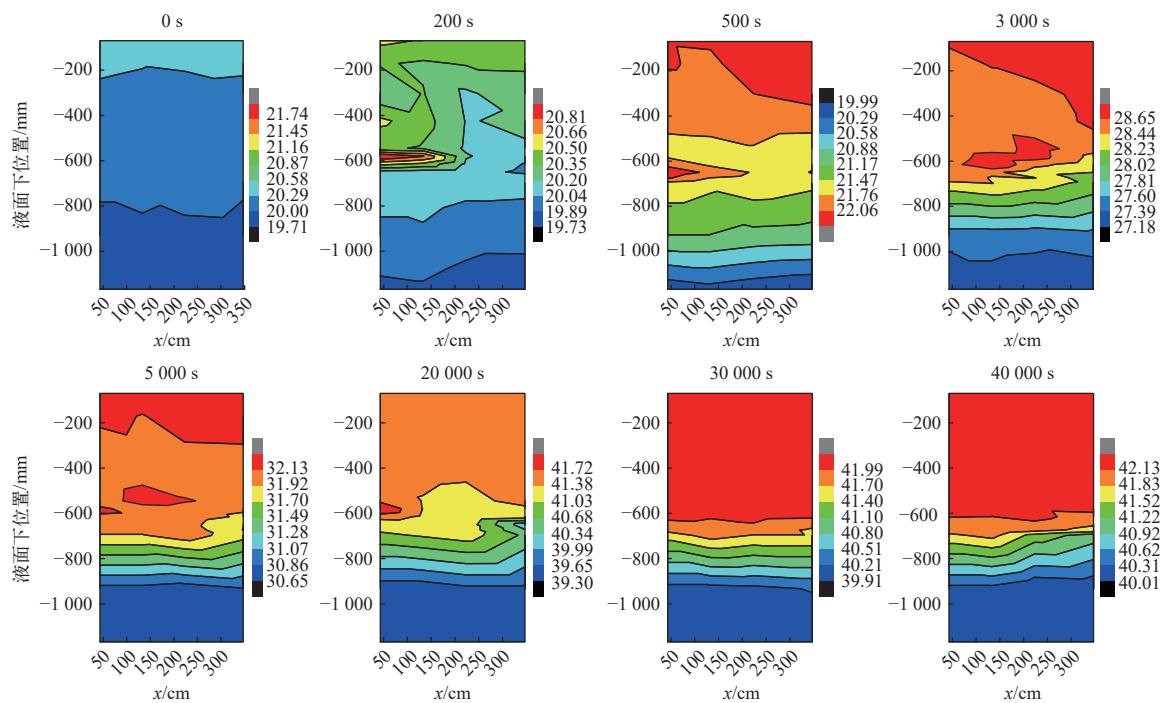


图 16 不同时刻热池内温度分布

Fig. 16 Temperature distribution of hot pool at different time

很直观得到自然循环建立的瞬态过程中,热池内不同位置温度分布的变化。从云图中温度分布的变化过程可知,堆芯出口流体温度较热池内温度高,在热流体的影响下,热池逐渐升温。堆芯出口热流体温度较高,对应的密度低,在浮升力的作用下热流体上浮至热池中较高位置处,堆芯上部热池温度上升,与此同时,热池底部由于独立热交换器出口冷流体的作用,温度持续低于热池上部流体。因此,很快在堆芯出口(-698 mm高度)以下位置处出现了冷热温度梯度较大的分层界面。随着时间的推移,热池内温度分层越来越明显,且最终温度界面位置总体上不变,但由于温度脉动的影响,即使是系统稳定后,温度分布仍处于脉动状态。

根据热池的温度分布瞬态变化可知,在模型内的热池中,出现了由于热流体进入而形成的热分层现象。即在堆芯较热流体的影响下,热池内上部流体在堆芯出口热流体的作用下下降,在独立热交换器出口较冷流体的作用下,热池底部较冷流体范围趋于扩大,两者在堆芯出口高度位置附近形成有较大温度梯度的交界面,这与目前国外开展过的热分层相关研究不同。在文献[12-17]开展的热分层模型研究中,均为堆芯出口流体温

度较热池温度低。由于停堆过程中堆芯功率下降速度高于一回路流量下降速度,此时,冷流体密度较大,随着冷流体的不断增多,上腔室冷热流体交界面不断上升,最终界面位置在达到中间热交换器入口高度处后上升速度减缓。而在纯自然循环阶段,依靠独立热交换器带走堆芯余热时,堆芯出口流体温度较热池高,以此来形成自然循环驱动力。这样在热流体的作用下,堆芯出口上部的热池温度逐渐升高,热池原有较低温度的流体不断下沉,同时独立热交换器出口冷流体也在源源不断地进入热池底部,最终将会在堆芯出口高度附近形成冷、热流体的交汇,产生温度梯度较大的热分层界面。随着上部热流体和下部冷流体的不断作用,冷热分层界面的区域逐渐变窄,温度梯度逐渐增大。

在该类型热分层形成的最初过程中,随着冷热交界面的下降,热池上部流体会向下部流动,从而在热池内部形成了冷却剂的局部环流。根据试验得到的上述热池各处温度的变化规律可知,在依靠布置在热池的独立热交换器带走事故工况下堆芯余热的过程中,以堆芯出口附近位置为分界线,将热池划分为上、下两部分,在此称之为上部热池和下部热池。上部热池和下部热池内温度梯

度小。上部热池和下部热池之间为热分层界面区, 温度梯度很大。在系统分析程序热池模型开发时, 可将热池简化为对应的3层。

5 堆芯及钠池相互作用

堆芯出口上部与中心测量柱的中间平面上, 布置了温度测点, 测量堆芯出口上部的温度。在堆芯测点如图17所示, 将温度测点编号为1~6。

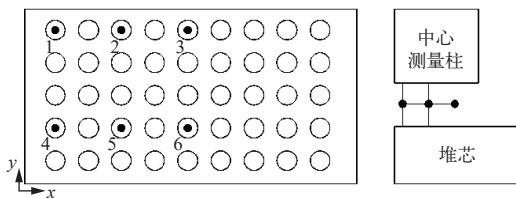


图17 堆芯出口上部冷却剂温度测点

Fig. 17 Temperature measuring position at top of core outlet

图18为自然循环达到稳定时, 堆芯出口上部冷却剂温度脉动幅值, 其中温度测点1损坏, 试验中只有2~6测点的结果。从测点4~6的结果对比可知, 冷却剂温度均值为42℃, 脉动幅度仍是

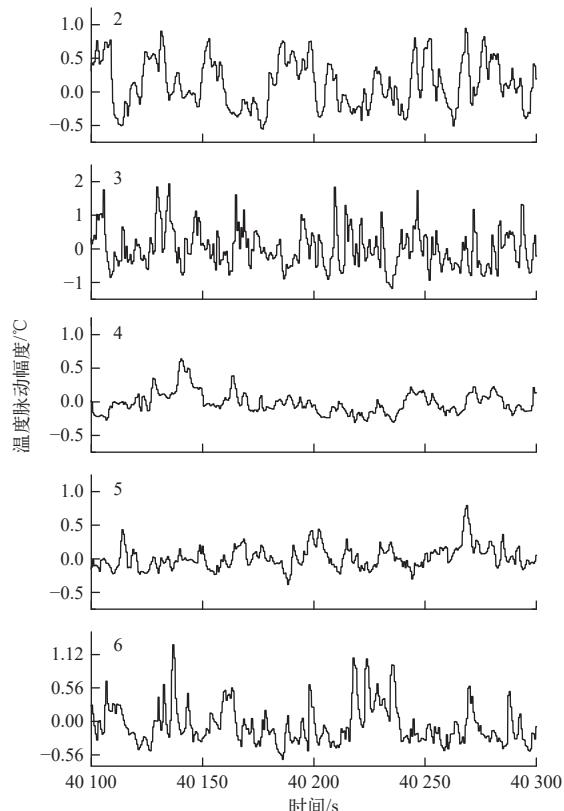


图18 堆芯组件出口上部冷却剂温度脉动幅值

Fig. 18 Amplitude of temperature fluctuation at place above outlet of core assembly

距堆芯边缘越近, 脉动幅度越大; 测点2、3的结果也呈现这种趋势, 同时, 测点2、3的温度脉动幅度较测点5、6的幅度大, 尤其是测点3的温度脉动幅度达到了最大正幅度2℃, 最小负幅度-1℃。对温度脉动幅度随时间的变化进行傅里叶变换得到频域, 如图19所示, 温度脉动频率以小于1Hz的低频为主。从试验结果可看到, 堆芯出口上部流体的温度脉动幅度很大, 主要形成原因是经过堆芯加热的热流体(包括组件盒内和盒间)与堆芯上部外围热池空间较冷的流体相互交混。

在堆芯以及上腔室冷却剂温度分布和流场的结果中, 均发现了在堆芯出口区域附近, 存在着堆芯出口上升的热流体与热池中下降的相对较冷流体的相互作用, 下降的冷流体甚至能够深入到组件盒内。图20为自然循环稳定后, 堆芯测点布置图3中最上面第1排的盒内温度脉动幅度。在试验中, 组件盒内出口的温度测点在设计时考虑了降低出口区域的影响, 布置在深入出口平面以下约20mm的位置, 但从图20仍可发现, 与边区非发热组件(5号)的温度信号相比, 盒内出口温度

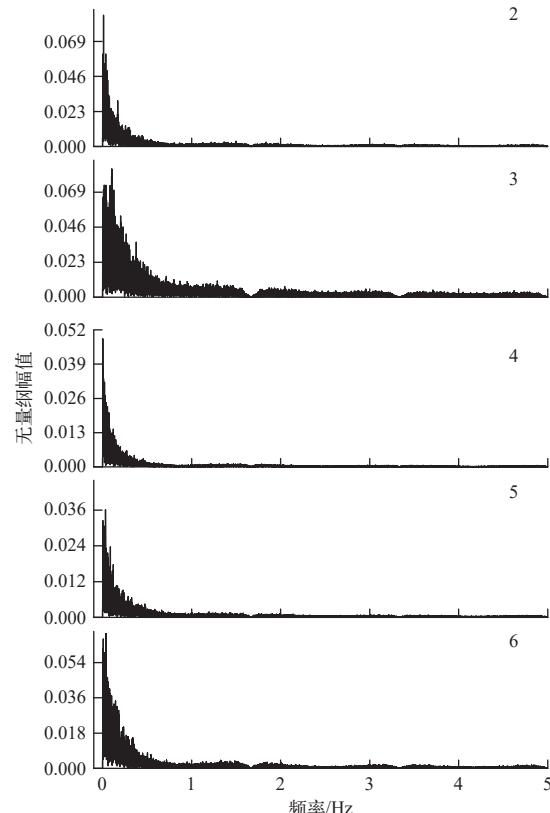


图19 堆芯出口上部冷却剂交混引起的温度脉动频域图

Fig. 19 Frequency spectrum of temperature fluctuation caused by coolant mixing in upper part of core outlet

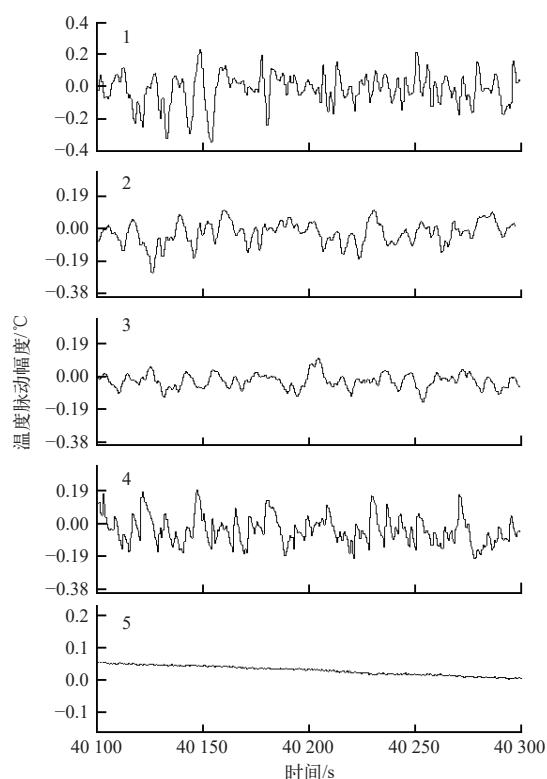


图 20 堆芯组件出口以下 20 mm 处流体温度脉动情况

Fig. 20 Temperature fluctuation at 20 mm below outlet of core assembly

仍存在着脉动。相对于盒间出口,组件盒内出口温度脉动幅度相对较小,这说明即使在组件盒内出口以下位置,仍会受到热池较低温度流体下沉形成的冷热流体交混的影响。

6 结论

通过对自然循环工况下堆芯及钠池等关键部件的冷却剂自然循环行为详细地研究,直接观测到了采用 DRACS 布置方式下一回路系统内冷却剂的流动路径和温度响应,能够为明确自然循环工况下热池内冷却剂热工水力现象和自然循环带走堆芯热量的过程、改进系统分析程序模型以及系统节点划分等提供重要支持。研究主要结论如下。

1) 根据堆芯出口和入口温度的瞬态变化可知,在自然循环建立的最初阶段,堆芯出口温度维持了较短时间没有上升;冷池温度上升引起组件入口温度上升后,堆芯出口才开始进一步升高。冷池对于短期自然循环的温度上升速度是有明显影响的。

2) 通过试验观测到了经过中间热交换器和通

过组件盒间空间的冷却剂自然循环流动,在堆芯出口较高温度流体上浮聚集在热池顶部的同时,热池内较低温度的流体下沉,在热池内部形成了局部流动;在组件盒壁热量的作用下,组件盒间空间冷却剂形成盒间流动。

3) 在中间热交换器失去热阱作用的情况下,仍然有热池冷却剂通过其进入冷池。随着自然循环的发展,冷池温度越来越高,最终到稳定状态时,中间热交换器出入口、出口与冷池的温度差别较小,此时自然循环建立的热阱作用主要来源于热池。

4) 在堆芯出口较高温度流体和独立热交换器出口较冷流体的共同作用下,热池内形成了温度分层界面位置在堆芯出口高度附近的热分层现象。热池按照温度分布可分成 3 部分:上部高温区、中部界面区和下部低温区。高温区和低温区内温度梯度较小,界面区温度梯度较大。分析程序模型开发时可将热池模型进行相应简化。

5) 热池内较低温度的冷却剂下沉到堆芯出口上方,与堆芯出口热流体交混,形成堆芯出口较大温度脉动,试验中观测到在组件盒内出口以下 20 mm 位置仍存在温度脉动,说明这种交混作用能够深入到组件内部,将会对自然循环的建立和维持带来不利的影响。

参考文献:

- [1] AOTO K, DUFOUR P, YANG H, et al. A summary of sodium-cooled fast reactor development[J]. *Progress in Nuclear Energy*, 2014, 77: 247-265.
- [2] 冯预恒,任丽霞,张志伟,等.中国实验快堆最终安全分析报告[R].北京:中国原子能科学研究院,2008.
- [3] IEDA Y, HAYASHI K, KAJIWAR H. Thermo-hydraulic study on natural circulation decay heat removal for a pool-type LMFBR[C]//International Conference on Fast Reactors and Related Fuel Cycles. [S. l.]: [s. n.], 1991.
- [4] IEDA Y, KAMIDE H, OHSHIMA H, et al. Strategy of experimental studies in PNC on natural convection decay heat removal[C]//IEAE-IWGFR Specialists Meeting on Evaluation of Decay Heat Removal Natural Convection. Narita: [s. n.], 1993: 37-50.
- [5] TAKEDA H, KOGA T. Study on similarity rule for natural circulation water test of LMFBR[R]. Chiba: [s. n.], 1993.

- [6] KAMIDE H, HAYASHI K, TODA S. An experimental study of inter-subassembly heat transfer during natural circulation decay heat removal in fast breeder reactors[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 1998, 183(1/2): 97-106.
- [7] KAMIDE H, HAYASHI K, ISOZAKI T, et al. Investigation of core thermohydraulics in fast reactors: Interwrapper flow during natural circulation[J]. *Nuclear Technology*, 2001, 133(1): 77-91.
- [8] AZARIAN M, ASTEGIANO M, TENCHINE M, et al. Sodium thermal-hydraulics in the pool LMFR primary vessel[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 1990, 124(3): 417-430.
- [9] BETTS C, ASHTON M W, SPENCE G, et al. European studies on fast reactor core inter-wrapper flows[C]//International Conference on Fast Reactors and Related Fuel Cycles. [S. l.]: [s. n.], 1991.
- [10] WEINBERG D, OSHIMA H, MARTEN K, et al. Thermo-hydraulic investigations on the transition from forced nominal to natural circulation DHR operation conditions in the reactor model Ramona[R]. Karlsruhe: Forschungszentrum, 1990.
- [11] TENCHINE D, GRAND D. Onset of natural circulation in a sodium loop[C]//Fourth International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal-hydraulics (NURETH-4). [S. l.]: [s. n.], 1989.
- [12] MORIYA S, TANAKA N, KATANO N, et al. Effects of Reynolds number and Richardson number on thermal stratification in hot plenum[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 1987, 99: 441-451.
- [13] IEDA Y, MAEKAWA I, MURAMATSU T, et al. Experimental and analytical studies of the thermal stratification phenomenon in the outlet plenum of fast breeder reactors[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 1990, 120: 403-414.
- [14] TANAKA N, MORIYA S, USHIJIMA S, et al. Prediction method for thermal stratification in a reactor vessel[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 1990, 120: 395-402.
- [15] MURAMATSU T, NINOKATA H. Investigation of turbulence modelling in thermal stratification analysis[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 1994, 150(1): 81-93.
- [16] WARD B, CLARK J, BINDRA H. Thermal stratification in liquid metal pools under influence of penetrating colder jets[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2019, 103: 118-125.
- [17] SCHNEIDER J, ANDERSON M, BAGLIETTO E, et al. Thermal stratification in a pool-type geometry[C]//The 18th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics. Portland: American Nuclear Society, 2019.
- [18] HOFFMANN H, MARTEN K, WEINBERG D, et al. Summary report of RAMONA investigations into passive decay heat removal[R]. Germany: Forschungszentrum Karlsruhe GmbH Technik und Umwelt, Inst. fuer Angewandte Thermo-und Fluiddynamik, 1995.
- [19] RUST K, WEINBERG D, HOFFMANN H, et al. Summary report of NEPTUN investigations into the steady state thermal hydraulics of the passive decay heat removal[R]. Germany: Forschungszentrum Karlsruhe GmbH Technik und Umwelt, Inst. fuer Angewandte Thermo-und Fluiddynamik, 1995.
- [20] MENTE V M, PANDEY G K, BANERJEE I, et al. Experimental studies in water for safety grade decay heat removal of prototype fast breeder reactor[J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2014, 65: 114-121.
- [21] ZARYUGIN D G, POPLAVSKII V M, RACHKOV V I, et al. Computational and experimental validation of the planned emergency heat-removal system for BN-1200[J]. *Atomic Energy*, 2014, 116(4): 271-277.
- [22] PAKHOLKOV V V, KANDAUROV A A, POTSELUEV A I, et al. Experimental investigation of a new method for advanced fast reactor shutdown cooling[J]. *Thermal Engineering*, 2017, 64(7): 496-503.
- [23] ISHII M, KATAOKA I. Scaling laws for thermal-hydraulic system under single phase and two-phase natural circulation[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 1984, 81(3): 411-425.
- [24] 程道喜, 陈东, 张学锋, 等. 一种用于钠冷池式快堆自然循环实验的燃料组件模拟件: CN112687409B[P]. 2022-10-28.
- [25] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 4 版. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [26] Lavision product specification[R]. Germany: Lavision Company, 2019.