

起伏因素影响自然循环流动的机理分析

姜胜耀, 杨星团*, 官厚军, 刘志勇, 郝文涛, 李军, 葛裴

(清华大学核能与新能源技术研究院 先进反应堆工程与安全教育部重点实验室, 北京 100084)

摘要:以一体化全功率自然循环反应堆模拟实验回路为物理原型,建立了起伏条件下自然循环流动的理论分析模型,并通过编制程序进行离散求解,分析了起伏对自然循环的影响机理。结果表明:1)起伏对自然循环具有重要影响,起伏幅度越大,或起伏周期越长,流量波动越大;2)起伏条件下的自然循环是交变力场和密度分布变化综合作用的结果;3)起伏对自然循环的影响在一定参数条件下可能比摇摆更显著,从而可能引起更加严重的后果,需要引起关注。

关键词:起伏;自然循环;一体化自然循环反应堆

中图分类号:TL333

文献标志码:A

文章编号:1000-6931(2009)S0-0092-05

Mechanism of Natural Circulation Taking Account Into Heaving Movement

JIANG Sheng-yao, YANG Xing-tuan*, GONG Hou-jun, LIU Zhi-yong,
HAO Wen-tao, LI Jun, GE Pei

(Key Lab of Advanced Nuclear Engineering and Safety of Ministry of Education,
Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: According to the simulation loop of full power natural circulation integrated-type reactor, the mathematical model taking account into heaving movement was established. By means of programming to solve the conservation equations, the mechanism of heaving on natural circulation was analyzed. The results show that heaving plays an important role on the natural circulation. Larger amplitude or longer period will result in more wide-coverage fluctuation. Natural circulation flow under heaving conditions ensues from both the alternating force and the alteration of density distribution. Under some certain conditions, heaving is likely to lead more serious consequence than rolling, and need to pay more attention.

Key words: heaving; natural circulation; full power natural circulation integrated-type reactor

收稿日期:2009-08-21;修回日期:2009-11-06

基金项目:国家自然科学基金资助项目(10872111);国家杰出青年基金资助项目(50325620)

作者简介:姜胜耀(1959—),男,吉林长春人,研究员,博士生导师,从事反应堆热工水力学研究

* 通信作者:杨星团(1970—),副研究员,博士,从事反应堆热工水力学研究,E-mail: yangxt@tsinghua.edu.cn

清华大学研制的低温核供热堆采用一体化全功率自然循环压水方式运行,体现了“一体化”和“非能动”的设计思想,具有固有安全特性。在陆地条件下已进行过大量研究,将其应用于海洋环境,会影响到自然循环反应堆的热工水力学特性,需要加以专门研究。

海洋条件下的运动可分解为3种基本的运动形态:倾斜、起伏和摇摆,它们对自然循环流动的影响机理各不相同。目前,国际上具有代表性的是日本^[1-2]和韩国^[3]的研究,国内哈尔滨工程大学^[4-5]、西安交通大学^[6]、清华大学^[7]等也开展过相关研究,但还不够充分,尤其是起伏对自然循环的影响研究较少。

清华大学核能与新能源技术研究院建设了海洋条件下一体化自然循环反应堆的模拟实验回路,为开展海洋条件下的自然循环研究奠定基础。本工作主要从理论分析的角度探讨起伏因素对自然循环流动特性的影响及其机理。

1 实验系统

实验系统包括3个回路,分别由模拟自然循环反应堆的实验装置回路、二回路和将热量散发给最终热阱的三回路组成。实验本体回路呈左右对称结构,由加热段、上升段、分流段、主换热器、下降段、回流段及稳压汽空间等组成。加热段由3个对称布置的加热通道组成,分别模拟不同位置的燃料组件。加热元件为模拟反应堆燃料元件的电加热棒,其直径、长度、栅距、表面热负荷等参数与实际反应堆相同。主换热器与实际反应堆所用主换热器在类型、结构、换热管尺寸、换热管排列方式等方面完全相同。每个部件均与实际反应堆相对应,并根据相应的准则数与实际反应堆进行模拟。该装置采用与实际反应堆完全相同的压力和温度,与日本、韩国、中国哈尔滨工程大学的实验装置在回路结构、运行参数、模拟程度等方面有一定区别。

图1示出实验本体装置的结构示意图。流体在加热段中被加热后向上流动,流经上升段被分流到两个换热器进行冷却,再经下降段、回流段回到加热段,从而组成自然循环回路。主换热器二次侧的入口温度通过三回路调节,加热段入口温度通过二回路调节,稳压器空间维持系统压力,并保证系统内的单相流动状态。

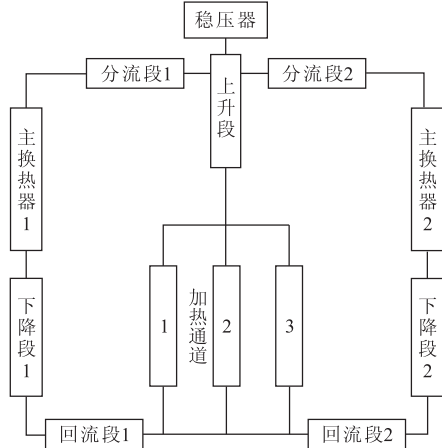


图1 海洋条件下自然循环实验装置示意图
Fig. 1 Sketch of experiment test loop for natural circulation at ocean condition

起伏使得内部流体受到附加力的作用,其方向始终与重力平行。与回路本身的自然循环相叠加并表现出更为复杂的流动形态。

2 数学模型

根据实验系统建立理论模型。将坐标系固定在实验本体上,流体的速度采用相对速度,转化为非惯性参考系问题,简化了数学模型。在运动坐标系中,质点相对运动的动量方程应包含惯性力项 $-a$ 。

流体守恒方程为:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial z} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial z} + f_z + \left(\frac{\partial p}{\partial z}\right)_f \tag{2}$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + v \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{Uq}{A\rho c} \tag{3}$$

起伏条件下的质量力为:

$$f_z = -g - a \tag{4}$$

$$a = a_{\max} \sin(\bar{\omega}_d t) \tag{5}$$

式中: ρ 为流体密度; v 为流速; p 为压力; f_z 为质量力; $(\partial p/\partial z)_f$ 为流动阻力; T 为流体温度; U 为湿周长度; q 为功率密度; A 为流道面积; c 为比热容; g 为重力加速度; a 为正弦规律的起伏加速度。

上述方程中的流速采用相对于实验本体的相对速度,补充必要的封闭性方程后,通过编制程序进行离散求解,进而分析起伏因素对自然

循环流动的影响。实际编制的程序中考虑了横摇、纵摇、倾斜、起伏及多种因素的复合作用,但本文主要讨论起伏因素的影响。

3 计算结果与分析

3.1 稳态计算与程序验证

通过程序计算结果与设计工况数据进行对比,表明了两者的相符性,从而验证了程序计算的准确性。图2示出了5.0 MPa下的计算结果,与设计工况数据基本相同。

起伏工况下的自然循环是一动态过程,一回路和二回路间存在耦合效应,因此,计算中包含了二回路的参数。图2中一回路加热段入口过冷度分别为44和64℃,二回路的入口过冷度分别为69和89℃。在进行起伏工况的计算时,一回路和二回路的入口温度及二回路的冷却水流量均保持不变,实验本体做起伏运动,将导致一回路自然循环流量及二回路出口温度发生波动。

3.2 起伏条件下的计算结果

为便于讨论起伏因素对自然循环的影响,

将流量进行归一化,即动态与稳态流量之比。

图3示出周期为3 s,起伏幅度分别为0.2g、0.4g、0.6g时一回路自然循环流量、加热段出口温度、二次侧出口温度的变化。由图3a可看出:相同周期下,起伏幅度越大,流量波动亦越大。由图3b可看出:经过若干个周期后,加热段出口过冷度变化呈现规律性,随起伏周期性波动;起伏周期3 s时,在开始阶段,由于下降段流体流入加热段需要时间,这段时间内加热段入口温度基本不变,流速的增大造成加热段出口过冷度的较大变化;起伏幅度越大,加热段出口过冷度变化亦越大,但波动量并不大。由图3c可看出:形成稳定波动后,换热器二次侧出口过冷度的波动量也不大。

图4示出幅度为0.6g、不同周期下一回路自然循环流量波峰波谷和加热段出口过冷度的变化。由图4a可看出:相同幅度下,起伏周期越长,流量波动越大。

与式(5)相对应的本体起伏运动的方程为:

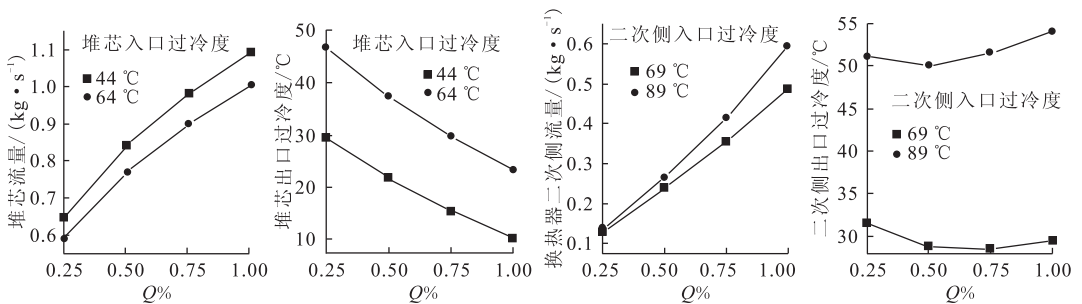


图2 稳态计算结果

Fig. 2 Calculation of steady state

$p=5.0\text{ MPa}, Q=175\text{ kW}, K_m=19.6$

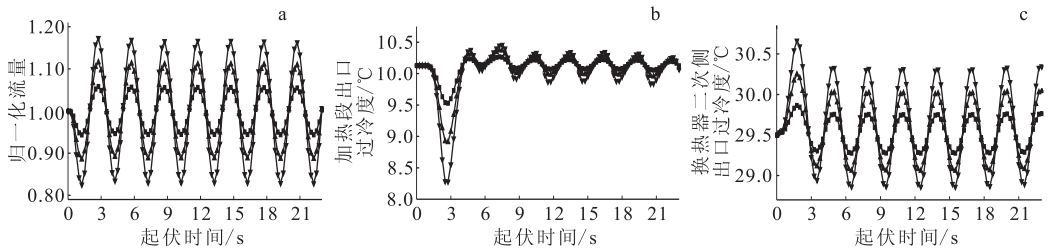


图3 起伏周期3 s时不同幅度下自然循环流量(a)、加热段出口过冷度(b)和二次侧出口过冷度(c)的变化

Fig. 3 Circulation flow rate (a), exit subcooling of heat section (b), and exit subcooling

of heat exchanger (c) at different heaving extents at 3 s period

$p=5.0\text{ MPa}, Q=175\text{ kW}$

■—0.2g; ▲—0.4g; ▼—0.6g

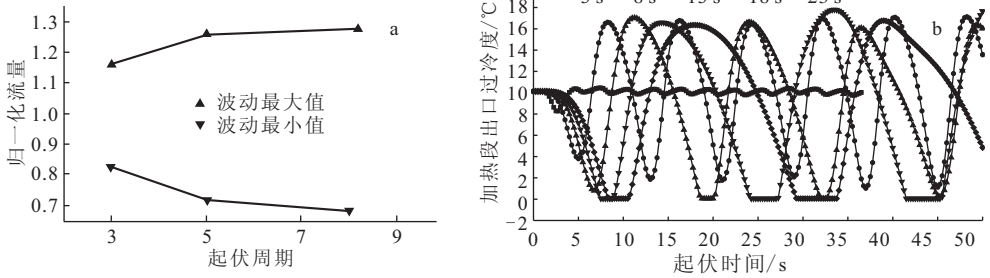


图4 起伏幅度为0.6g时不同周期下循环流量波峰波谷(a)和加热段出口过冷度(b)的变化

Fig. 4 Wave limit of circulation flow rate (a) and exit subcooling of heat section (b)

at different heaving periods at 0.6g heaving extent

$p=5.0\text{ MPa}, Q=175\text{ kW}$

$$A = A_{\max} \sin(\bar{\omega}_d t) = \frac{a_{\max}}{\bar{\omega}_d^2} \sin(\bar{\omega}_d t + \pi) \quad (6)$$

而:

$$\bar{\omega}_d = 2\pi/T \quad (7)$$

由此可见,起伏周期以平方关系影响起伏运动的剧烈程度,对自然循环流动有较大影响。

由图4b可看出:0.6g下,起伏周期为13s时加热段出口已达到饱和,而在8s周期时,加热段出口温度的波动量约为15℃。本文不讨论两相的情况。

3.3 起伏因素对自然循环影响的机理分析

实验本体的起伏运动使得内部流体受到附加力的作用,其方向始终与重力平行。将坐标系建立在运动的本体上,在非惯性系中观察起伏条件下流体的相对运动,等价于一交变力场作用下的自然循环流动,这个交变的力场方向不变,大小为:

$$-g - a = -g - a_{\max} \sin(\bar{\omega}_d t) \quad (8)$$

因此,起伏条件下的自然循环驱动力可通过下式表示:

$$\Delta p_d = \Delta \rho(t)(g + a)H = \Delta \rho(t)gH + \Delta \rho(t)a_{\max} \sin(\bar{\omega}_d t)H \quad (9)$$

其中: $\Delta \rho(t)$ 为不同时刻冷热流体的密度差。

实际计算中并不是通过上式计算循环驱动力,而是进行更为详细的网格划分。

式(9)表明:起伏条件下的自然循环驱动力包括重力的作用和起伏引入的附加力的作用这两部分。

当起伏引起的温度波动较小时,对应的回路中密度分布的变化也较小。如果这种变化可忽略不计,那么,起伏条件下的自然循环流量等价于重力作用下的稳态流量和相同温度分布下

的起伏附加力场引起的自然循环流量的简单叠加,即此时重力和起伏附加力是相互独立而互不影响的,对回路中自然循环流动的作用具有简单叠加性。

当起伏引起的温度波动较大时,对应的回路中密度分布的变化也较大,此时,上述的简单叠加性将不再满足。与静止条件下的稳态自然循环相比,由于起伏造成循环流量的变化使得温度分布发生变化,相应的密度分布也不同,反过来又会影响到自然循环的驱动能力。因此,起伏条件下的自然循环是交变力场和密度分布变化综合作用的结果,具有如图5所示的影响关系链,即:起伏引入的附加作用力使得自然循环驱动力发生变化,从而引起循环流量的变化;自然循环流量的变化改变了回路温度分布的变化,引起相应的密度分布的变化,反过来影响自然循环的驱动力,从而改变循环流量。

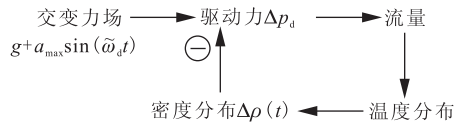


图5 起伏条件下自然循环的驱动机理

Fig. 5 Driven mechanism for natural circulation at heaving movement condition

与重力作用一致的起伏附加力将引起循环流量的增加,使得加热段出口温度降低,冷热腿密度差有减小的趋势,因此,回路系统内部存在某种负反馈的作用机制。但需指出,动态问题相当复杂,包括系统内部的这种负

反馈作用机制。

3.4 起伏和摇摆的综合作用

图6示出了起伏和纵摇及起伏和横摇共同作用下的自然循环。

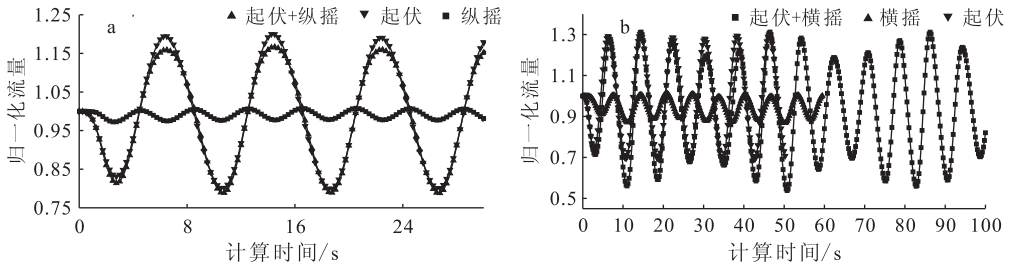


图6 起伏和纵摇(a)及起伏和横摇(b)共同作用下的自然循环

Fig. 6 Circulation flow rate of heaving movement accompanied with longitudinal rolling (a) and transverse rolling (b)

a—纵摇周期 8 s,幅度 22.5°;b—横摇周期 13 s,幅度 22.5°

$p=5.0$ MPa, $Q=175$ kW,起伏周期 8 s,幅度 0.6g

4 结论

1) 起伏对自然循环有重要影响,起伏幅度越大或起伏周期越长,流量波动越大。

2) 起伏条件下的自然循环是交变力场和密度分布变化综合作用的结果。

3) 在一定参数条件下,起伏对自然循环的影响可能比摇摆更显著,从而可能引起更加严重的后果,需要引起关注。

参考文献:

- [1] MURATA H, IYORI I, KOBAYASHI M. Natural circulation characteristics of a marine reactor in rolling motion[J]. Nuclear Engineering and Design, 1990, 118: 141-154.
- [2] IYORI I, AYA I, MURATA H, et al. Natural circulation of integrated-type marine reactor at inclined attitude[J]. Nuclear Engineering and Design, 1987, 99: 423-430.
- [3] HIROYUKI M, KEN-ICHI S, MICHYUKI K. Natural circulation characteristics of a marine reactor in rolling motion and heat transfer in the core[J]. Nuclear Engineering and Design, 2002, 215: 69-85.
- [4] 谭思超, 庞凤阁, 高璞珍. 摇摆对自然循环传热特性影响的实验研究[J]. 核动力工程, 2006, 27(5): 33-36.
- TAN Sichao, PANG Fengge, GAO Puzhen. Ex-

由图6可看出:起伏对自然循环的影响在一定参数条件下可能比摇摆更显著,从而可能引起更加严重的后果。因此,起伏对自然循环的影响是一需要引起关注的问题。

perimental research of effect of rolling upon heat transfer characteristic of natural circulation[J]. Nuclear Power Engineering, 2006, 27(5): 33-36 (in Chinese).

- [5] 谭思超, 张红岩, 庞凤阁, 等. 摇摆运动下单相自然循环流动特点[J]. 核动力工程, 2005, 26(6): 554-558.
- TAN Sichao, ZHANG Hongyan, PANG Fengge, et al. Characteristics of single-phase natural circulation under rolling[J]. Nuclear Power Engineering, 2005, 26(6): 554-558(in Chinese).
- [6] 苏光辉, 张金玲, 郭玉君, 等. 海洋条件对船用核动力堆余热排出系统的影响[J]. 原子能科学技术, 1996, 30(6): 487-491.
- SU Guanghui, ZHANG Jinling, GUO Yujun, et al. Effects of ocean conditions upon the passive residual heat removal system (PRHRS) of ship reactor[J]. Atomic Energy Science and Technology, 1996, 30(6): 487-491(in Chinese).
- [7] 杨钰, 贾宝山, 俞冀阳. 海洋条件下冷却剂系统自然循环仿真模型[J]. 核科学与工程, 2002, 22(2): 125-129.
- YANG Yu, JIA Baoshan, YU Jiyang. Simulation model of natural circulation in PWR coolant system under ocean conditions[J]. Chinese Journal of Nuclear Science and Engineering, 2002, 22(2): 125-129(in Chinese).