

密度锁内分区模型研究

王升飞¹, 阎昌琪², 闫修平³, 玉宇¹, 牛风雷¹

(1. 华北电力大学 非能动核能安全技术北京市重点实验室, 北京 102206;

2. 哈尔滨工程大学 核科学与技术学院, 黑龙江 哈尔滨 150001; 3. 环境保护部 核与辐射安全中心, 北京 100082)

摘要:通过实验研究流速对密度锁内温度场和分层的影响,并建立了分区模型。研究表明:密度锁可分为混合区、分层区和恒温区,其中分层区又可分为强分层与弱分层,分层界面则位于混合区与分层区之间。此外,本文还将密度锁内温度场分为5类,其中第2类温度场最好,是密度锁正常工作时的最佳选择。

关键词:非能动设备;密度锁;分区模型;强分层;弱分层

中图分类号:TL364

文献标志码:A

文章编号:1000-6931(2014)S0-0264-04

doi:10.7538/yzk.2014.48.S0.0264

Research on Zone Model of Density Lock

WANG Sheng-fei¹, YAN Chang-qi², YAN Xiu-ping³, YU Yu¹, NIU Feng-lei¹

(1. *Beijing Key Laboratory of Passive Safety Technology for Nuclear Energy, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;*

2. *College of Nuclear Science and Technology, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China;*

3. *Nuclear and Radiation Safety Center, Ministry of Environmental Protection, Beijing 100082, China*)

Abstract: The effect of velocity on temperature field and stratification in density lock was studied through experiment. A new zone model was proposed. The results show that fluid in density lock can be divided into three zones including mixing zone, stratification zone and constant temperature zone. The stratification zone can be divided into strong stratification and weak stratification, and the interface is located between the mixing zone and the stratification zone. Additional, the temperature field of density lock is divided into five categories in which the second class is the best for normal work.

Key words: passive device; density lock; zone model; strong stratification; weak stratification

分层流是指在重力作用下由于流体密度的差异而形成的流动。分层流广泛存在于自然界和工业生产中,诸如海洋中的温跃层、大型建筑空间的热分层、核电站的水平管线以及波动管

等^[1]。利用分层能隔离两侧流体的特点,瑞典的ABB公司提出了1种非能动设备——密度锁,并设计了1种新型固有安全反应堆 PIUS^[2]。密度锁是安装在反应堆主冷却剂系统与事故冷却

系统边界上的 1 个设备。由于高温的主冷却剂和冷的硼酸溶液产生的密度差而形成稳定的分层。通过主冷却剂在穿过堆芯上升的过程中产生的压降与上下密度锁中两个界面之间的静压差相等,使分层界面稳定在密度锁内,隔离事故冷却系统,从而确保反应堆的正常运行。一旦发生事故,密度锁将自动开启,硼酸溶液注入主冷却剂系统,使反应堆停堆并通过自然循环将堆芯热量带走,从而保证反应堆安全停堆。目前国外学者对于密度锁的研究已经开展了一些积极的探索,但主要集中在密度锁控制和新型概念堆设计上^[3-6]。密度锁技术的关键是能否形成稳定的分层。本文主要通过实验与理论分析相结合的方法,对密度锁内的分区模型进行研究,为下一步密度锁的建模奠定基础。

1 实验装置与方法

实验装置如图 1 所示。实验主体部分由上水箱、实验管段、下水箱及循环回路组成。上水箱通过温控器和循环回路保持设定温度,为密度锁提供入口处的恒温热源(T_H)。水循环回路,水由上水箱抽出经涡轮流量计和水泵后返回上水箱,为密度锁提供扰动。实验段内传热有两种途径:通过实验段内流体向下水箱传热和通过管壁向空气散热。密度锁实验管段内布置格架作为密度锁结构。下水箱为密度锁出口处冷源(T_L),实验中等于室温(T_∞)。热电偶布置于实验段中心位置,从上水箱贯穿实验管段至下水箱。坐标以上水箱底部为起始位置,向下为正。

首先向实验装置加水,调节温控器温度至设定值,随后开启水泵,调节流量至设定值,打

开加热器并采集热电偶温度。分层形成后向上水箱添加染料,观察界面位置。当热电偶温度不再随时间改变时,认为实验段达到稳态。分层照片如图 2 所示,可看出分层界面将上、下两层流体隔离。



图 2 密度锁内分层照片

Fig. 2 Photograph of stratification in density lock

2 实验结果

图 3 为不同流速情况下在分层结束时密度锁内温度分布。以流速 0.34 m/s 为例,曲线可分为混合区(I)、导热区(II)、恒温区(III)3 个区间^[6],其中最重要的就是导热区,即分层区,它出现的位置及其长度均直接关系着密度锁能否正常工作。

随流速的增加,实验段上部流体获得的能量增大,从而向下传递深度增长,对分层界面的影响也越大。由图可看出,随流速的增大温度分层位置下移并且温度梯度逐渐减小。当流速小于 0.45 m/s 时,III 区基本保持初始温度不变,II 区中存在较大的温度梯度;当流速在

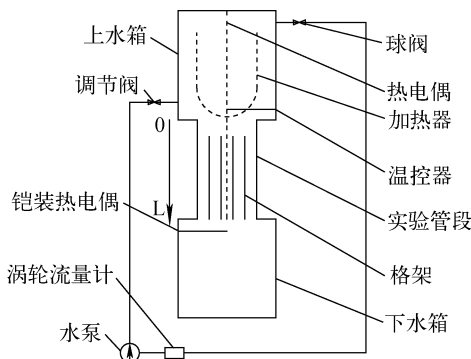


图 1 实验装置简图

Fig. 1 Scheme of experimental apparatus

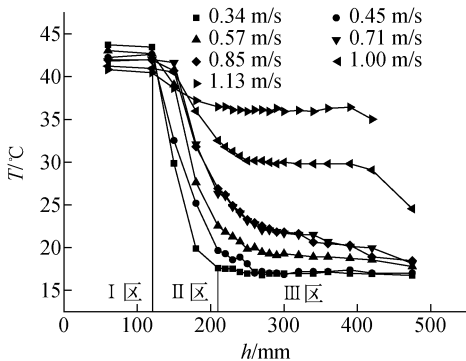


图 3 不同流速下分层结束时密度锁内温度分布

Fig. 3 Distribution of temperature after stratification formed with different flow rates

0.45~0.57 m/s 之间时,Ⅲ区温度虽较初态时的升高了少许,但仍维持恒温,Ⅱ区长度略有增长,导致温度梯度减小;当流速增加至 0.57~1.0 m/s 之间时,Ⅱ区与Ⅲ区已很难区分,Ⅲ区中温度不再维持不变,而产生了较小的温差,可以说此时的温度梯度是由位于原Ⅱ区中相对较大的温度梯度和原Ⅲ区中较小的温度梯度共同组成;当流速继续增加,达到 1.0 m/s 甚至 1.13 m/s 以上时,分层结束时最大温度梯度只有 0.13 °C/mm,且随时间不断减小,同时下水箱也被加热,温度逐渐升高,分层消失,密度锁失效。

3 分区模型讨论

在上节的实验分析中,根据密度锁内温度分布的特点将密度锁简单分为了 3 个区域:Ⅰ区、Ⅱ区和Ⅲ区。由实验可看出,这种分区定义比较模糊,很难给出清晰的分界。因此,本节在总结实验的基础上,建立 1 种新的密度锁分区模型。

新分区模型可简单概括为:3 区 2 层 1 界面,如图 4 所示。3 区是指混合区、分层区和恒温区;2 层是指分层区中分为强分层和弱分层;1 界面是指位于混合区与分层区交界处的分层界面。混合区位于密度锁上部,在主回路水平剪切力的作用下,内部流体发生剧烈搅混,传热方式以对流换热为主,区内温度均匀,浮力效应可忽略。分层界面位于混合区与分层区的交界处,将上、下两侧流体隔离;流体从该处温度开始降低,浮力效应不可忽略,传热方式开始向以导热为主转变。分层区位于混合区下方,内部流体存在较大的温度梯度,密度变化较大;在浮力的作用下,流体搅混程度逐渐减弱,整个

区域流体静力学稳定。在分层区内根据温度梯度不同,分为强分层和弱分层。当温度梯度 $\geq (T_H - T_L)/L$ (图中虚线所示),为强分层;反之,为弱分层。恒温区位于分层区下方,内部流体基本静止,传热方式为导热,当其温度与反应堆水池相同时,传热量近似为零。

在分区模型基础上,对各种实验条件下温度场进行分类,如图 5 所示。

1) 混合区等于零,其余各区不为零。

密度锁内流体处于静止状态,传热方式为导热,分层界面稳定,只需满足热量平衡即可达到稳态(图 5a)。属于此类的只有静态条件下实验。

2) 弱分层近似为零,其余各区不为零。

密度锁内扰动能量较弱,无法传递到密度锁底部;密度锁下部存在恒温区,温度梯度大;需要同时满足力平衡和热平衡才能达到稳态(图 5b)。属于此类的实验有:流速小于 0.45 m/s 的实验。

3) 弱分层近似为零,原恒温区温度升高形成新的恒温区,其余各区不为零。

扰动能量较强,在初始温差时可传递到密度锁底部,使原恒温区消失;温差形成后,温度梯度较大,扰动受到浮力抑制无法传递至底部,形成新的恒温区;当满足热力学平衡时可近似达到稳态(图 5c)。属于此类的实验有:流速在 0.45~0.57 m/s 之间的实验。

4) 恒温区等于零,其余各区不为零。

扰动能量很强,恒温区不存在;当温差出现后,扰动能量仍较大,界面波动剧烈,界面以下仍有较小的运动,形成弱分层(图 5d)。属于此类的实验有:流速在 0.57~0.85 m/s 之间的实验。

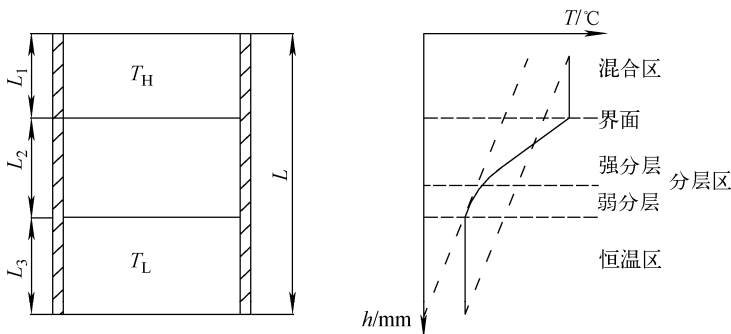


图 4 分区模型示意图

Fig. 4 Schematic diagram of zone model

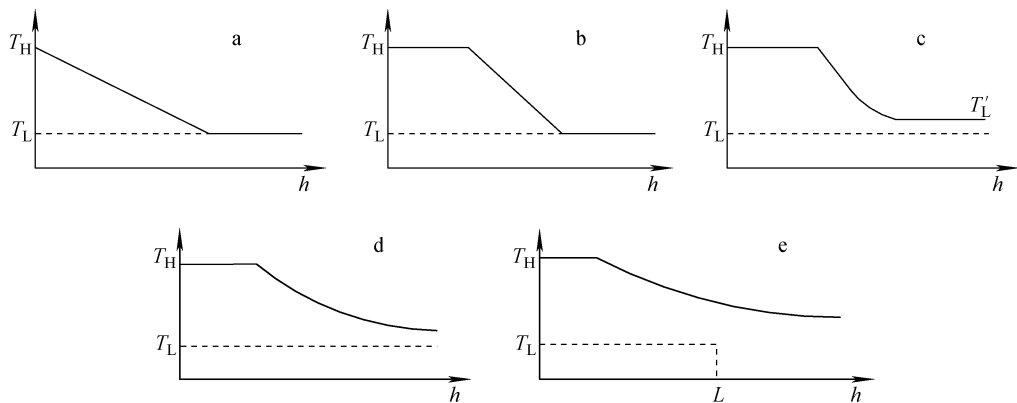


图5 温度场分类

Fig. 5 Temperature field categories

5) 恒温区等于零,强分层近似为零。

扰动能量极强,分层区温差较小,强分层很难形成或很快消失,多为弱分层,并且分层区延伸出密度锁,导致密度锁下侧流体也发生对流传热传质(图 5e)。属于此类的实验有:流速大于 1.0 m/s 的实验。

以上各类中,第 1 类属于静态条件,即无扰动(静止)工况,实际中不能实现;第 5 类中发生传热传质,无分层形成,密度锁失效。因此,密度锁在正常工作时只能为第 2、3、4 类 3 类中的 1 种,其中第 2 类分层温度梯度最大、稳定性好,与第 1 类温度场最接近。因此,密度锁在正常工作时应尽量形成第 2 类温度场。

4 结论

本文通过实验对不同流速下密度锁内的温度场进行了研究。根据实验结果建立了密度锁分区模型。密度锁可分为混合区、分层区和恒温区,其中分层区又分为强分层与弱分层,分层界面位于混合区与分层区之间。并且,以分区模型为基础,将密度锁内温度场分为 5 类,其中第 2 类分层温度梯度大、稳定性好,与静态条件最接近,因此应尽量使密度锁内温度场为第 2 类。

参考文献:

[1] YASUTERU S, TAISUKE Y, YOSHINARI A, et al. Experimental investigation on similarity

between velocity and density profiles in density-stratified countercurrent flow in reactor horizontal leg[J]. Nuclear Engineering and Design, 2000, 201(1-2): 83-98.

- [2] JOHN P E, KUPITZ J, CLEVELAND J, et al. IAEA activities on passive safety systems and overview of international development[J]. Nuclear Engineering and Design, 2000, 201(48): 49-54.
- [3] HIROAKI W. Response of the ISER for a beyond-design-basis hypothetical accident[J]. Nuclear Engineering and Design, 1995, 158(1-2): 133-147.
- [4] MEHEDINTEANU S. An application of the new way to prevent core melting in pressure tube reactor (CANDU type)[J]. Annals of Nuclear Energy, 2001, 28(1): 79-88.
- [5] CARELLI M D, CONWAY L E, ORIANI L, et al. The design and safety features of IRIS reactor [J]. Nuclear Engineering and Design, 2004, 230(1-3): 151-167.
- [6] 王升飞, 阎昌琪, 谷海峰, 等. 密度锁内流体稳态传热模型的建立[J]. 原子能科学技术, 2010, 44(2): 183-187.
- WANG Shengfei, YAN Changqi, GU Haifeng, et al. Development of steady-state heat transfer model in density lock[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2010, 44(2): 183-187(in Chinese).