

# 摇摆运动条件下自然循环 复合型脉动的实验研究

谭思超<sup>1,2</sup>, 高璞珍<sup>2</sup>, 苏光辉<sup>1</sup>

(1. 西安交通大学 动力工程多相流国家重点实验室, 陕西 西安 710049;

2. 哈尔滨工程大学 核科学与技术学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:**对摇摆运动条件下的自然循环两相流动不稳定性进行实验研究。实验结果表明:摇摆运动造成的两相流动不稳定性(波谷型两相流动不稳定性)和密度波型脉动相互叠加形成复合型脉动,加剧了系统的两相流动不稳定性。复合型脉动分为不规则的复合型脉动和规则的复合型脉动两部分,复合型脉动仅发生在高欠热度区域。规则的复合型脉动发生边界与相同热工水力参数下的密度波型脉动边界接近且受摇摆参数影响较小。

**关键词:**摇摆运动;流动不稳定性;密度波型脉动;复合型脉动;自然循环

**中图分类号:**TL33 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-6931(2008)11-1007-05

## Experimental Research on Natural Circulation Complex Oscillations Under Rolling Motion Conditions

TAN Si-chao<sup>1,2</sup>, GAO Pu-zhen<sup>2</sup>, SU Guang-hui<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. College of Nuclear Science and Technology, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

**Abstract:** Natural circulation flow instability under rolling motion conditions was experimentally studied. Experimental results show that the complex flow oscillations are formed due to the overlapped effect of the rolling motion (trough instability) and density wave oscillation. The system becomes more instable because of the occurrence of complex flow oscillations. Complex flow oscillations only occur in the case of high subcooling and may be divided into two types, regular and irregular complex flow oscillations. Under the same thermohydraulic conditions, the marginal stability boundary (MSB) of regular complex oscillations is similar to that of density wave oscillation without rolling motion. And the influences of rolling amplitude and rolling period on its MSB are slight.

**Key words:** rolling motion; flow instability; density wave oscillation; complex flow

收稿日期:2007-06-28;修回日期:2007-09-06

基金项目:中国博士后科学基金资助项目(20060401002);国家自然科学基金资助项目(50806014);新世纪优秀人才支持计划资助项目(NCET-06-0837)

作者简介:谭思超(1979—),男,山东龙口人,讲师,博士后,核能科学与工程专业

oscillation; natural circulation

研究海洋条件下的自然循环对于提高船用核动力装置的安全性和安静性具有重要意义。目前,国内外已开展了针对海洋条件下自然循环的研究<sup>[1-4]</sup>,但多以单相自然循环为研究对象。对于两相自然循环流动,特别是针对两相流动不稳定性研究较少。与稳态条件下的流动不稳定性机理不同,摇摆运动条件下的两相流动不稳定性是由于流量波动且在流量最低点发生的脉动,且海洋条件造成的两相不稳定性与热工水力脉动相互叠加,形成复合型脉动,加剧了系统的不稳定性。M. Hiroyuki<sup>[5]</sup>在研究中观察到了起伏造成的波动和自持脉动的叠加;本工作在研究中也观察到摇摆引起的波动和密度波型脉动的叠加现象<sup>[6]</sup>。相对于起伏条件,摇摆条件综合了起伏、倾斜和旋转的效应,影响更为复杂。因此,本工作针对摇摆运动条件下的自然循环复合型脉动进行研究。

## 1 实验装置

摇摆运动条件下自然循环复合型脉动实验在哈尔滨工程大学摇摆实验装置上进行。有关实验装置的详情参见文献<sup>[6-9]</sup>。试验参数如下:入口欠热度,10~60℃;摇摆振幅,分别为10°、15°和20°;摇摆周期,分别为5、7.5、10、12.5和15s;压力,0.1~0.4MPa。

## 2 实验现象

### 2.1 波谷型两相流动不稳定性

摇摆运动造成系统中冷却剂的波动,随着加热功率的提高,在流量波动曲线的最低点,即波谷点,汽泡大量急速产生,形成周期与摇摆周期一致的压降振荡,即两相流动不稳定性<sup>[6]</sup>。因两相不稳定性发生在流量波动的波谷点,故称为波谷型两相不稳定性。若在波谷型两相不稳定性发生时停止摇摆,则系统可回复到稳定的自然循环流动状态。

### 2.2 复合型脉动

继续增加功率,则汽泡的产生不受流量波谷点的限制,当功率增加到足够高时,脉动可在流量波谷点以外发生,形成多周期的复合型脉动。从实验装置的观测窗可观察到,在这种条

件下,汽泡的产生已不受流量最低点的限制,流量波动曲线也相应变化(图1)。由图1可知:在复合型脉动形成的初期,流量波动曲线不规则,随着加热功率的升高,逐渐形成规则的脉动。如果在规则的复合型脉动发生时停止摇摆,则系统与在低功率条件下自动回复到稳定状态不同,它仍然处于不稳定状态,从波形上判定为典型的密度波型脉动,脉动周期为3.6~5.2s。如果在不规则的复合型脉动发生时停止摇摆,系统则处于两相自然循环流动中,稍受扰动即可能发生密度波型脉动。相反,当稳定的两相系统运行在稳定区域边界的附近时,系统一旦受到摇摆运动的影响,则稳定的流动将转变为不稳定的流动。因此,可以判定,复合型脉动是由摇摆引起的波谷型两相不稳定性与密度波型脉动的叠加构成的。

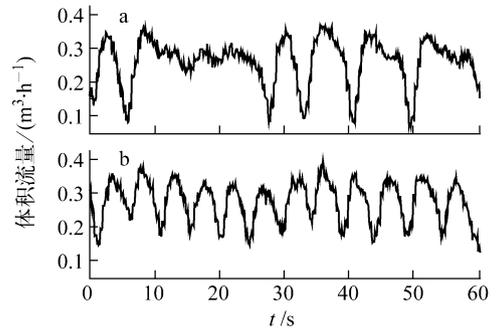


图1 复合型脉动

Fig.1 Complex oscillations

a——不规则复合型脉动;b——规则复合型脉动

形成不规则复合型脉动的原因是:波谷型两相流动不稳定性是一种完全受摇摆制约的两相流动不稳定性,而规则复合型脉动是一种不受摇摆制约,但受密度波型脉动制约的两相流动不稳定性。不规则复合型脉动则是介于二者之间的一种过渡状态,在过渡过程中,脉动突破了波谷点的限制,但仍受流量波动高点的限制,稳定而有规律的密度波型脉动尚未形成,所以,形成比较复杂的物理现象。因此,在规则复合型脉动发生后,停止摇摆运动,密度波型脉动不受影响;而不规则复合型脉动发生后,停止摇摆运动,则不会发生密度波型脉动。

### 2.3 规则复合型脉动的周期

规则的复合型脉动是一种具有固定周期的脉动,其周期与两种脉动的波谷点是否重合有关。尽管密度波型脉动可在摇摆运动下流量波谷点外发生,但摇摆运动下流量的波谷点仍然是最易发生密度波型脉动的地方,所以,两种波动的波谷点很容易重合,而叠加后总体波动的周期恰好又是摇摆周期和密度波型脉动周期的最小公倍数,以摇摆周期为 7.5 s 时最为明显。如图 2 所示,本试验系统中密度波型脉动的周期为 3.6~5.2 s,当摇摆周期为 10 s 时,每个摇摆周期内包含 2 个周期的密度波脉动;当摇摆周期为 7.5 s 时,每 15 s 出现周期约为 5 和 10 s 的两个波动。

由于密度波型脉动的周期随加热功率变化,在摇摆周期与密度波型脉动周期不是整数倍关系的情况下,两种脉动的波谷点难以一一重合,所以,叠加后的总体脉动曲线也呈现出多样性。如摇摆周期为 7.5 s 时,有时每个摇摆周期内会出现 2 次密度波型脉动,有时前 1 个摇摆周期内发生叠加,而后 1 个摇摆周期内又不发生叠加;在摇摆周期为 15 s 时,每个摇摆周期可包含 3 个或 4 个周期的密度波型脉动。

从图 2 可见,两种脉动的波谷点重合时,叠加后的总体脉动较为剧烈,此处流量较其他单一波动(密度波型或摇摆)的波谷点处的流量明

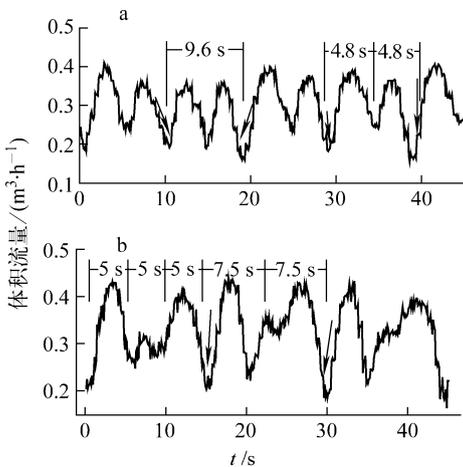


图 2 规则复合型脉动的周期

Fig. 2 Period of regular complex oscillations

a——摇摆周期 10 s; b——摇摆周期 7.5 s

显降低(如图 2 中箭头所示)。当摇摆周期为 5 s 时,因两种波动频率相对接近,叠加效应更为明显。在不规则复合型脉动中,由于叠加的随机性较大,有时会形成较大的总体波动,从而破坏系统的稳定性。

### 2.4 高含汽率条件下的小振幅脉动

在入口欠热度较低的工况下,随着功率的增加,叠加效应将减弱,波动幅度大幅减小,甚至不发生波动(图 3)。此时停止摇摆,从观察窗可看到系统处于稳定的环状流状态。

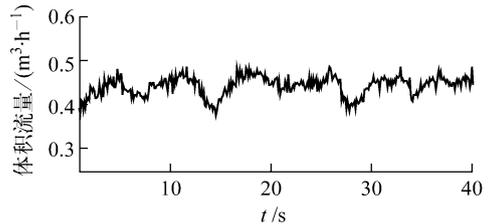


图 3 摇摆运动及高含汽率条件下的小振幅脉动

Fig. 3 Oscillations with small amplitude under rolling motion and high outlet volumetric quality condition

## 3 实验分析

### 3.1 稳定性分析

不规则复合型脉动是一种过渡状态,产生的随机性较大,实验结果的重复性较差,其边界缺少规律性,不予讨论。这里仅针对规则复合型脉动进行讨论。图 4 为摇摆运动工况下波谷型两相流动不稳定性与规则复合型脉动的发生边界,因为摇摆运动下流量处于波动状态,不易选取特征流量,所以,图 4 采用直观参数而非无量纲参数描述稳定边界。

从图 4 可看出,规则复合型脉动仅在高入口过冷度区域( $>20^{\circ}\text{C}$ )发生,且发生边界与密度波型脉动边界接近,即当系统无摇摆运动时,若系统发生密度波型脉动,在对系统施加摇摆运动后,系统的脉动则转变为规则复合型脉动。

从图 4 还可看出,摇摆运动工况下的稳定区域由两部分组成:第 1 个稳定区是以单相流体或低出口含汽率为主的稳定流动,当加热功率超过稳定边界时,系统将发生波谷型两相流动不稳定性,继续增加功率,将发生复合型脉动;第 2 个稳定区则表现在低入口欠热度工况

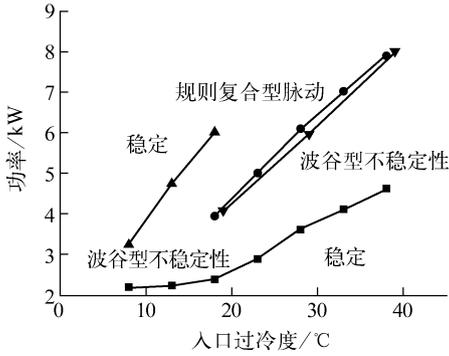


图4 摇摆运动条件下的两相流动不稳定性边界  
Fig. 4 Boundary of flow instability under rolling motion conditions

■——波谷不稳定性边界；●——规则复合型脉动边界；  
▲——高含汽率稳定流动边界；▼——密度波型脉动边界

下,在加热功率升高到第2稳定区的稳定边界后,系统将出现以高出口含汽率为主的稳定流动。两个稳定区域中间包含1个不稳定区域。

在高入口欠热度区域两相流动不稳定性发生后,如果停止摇摆,系统则处于单相或低出口含汽率稳定流动状态;在规则复合型脉动发生后,停止摇摆,系统则处于密度波型脉动状态。在第2稳定区和第1稳定区中间的不稳定区域,停止摇摆,系统则处于高出口含汽率的稳定流动状态,不摇摆和摇摆运动工况下的对应关系极其明显。

随入口欠热度的降低,特别是当出现两相流动后,自然循环驱动压头增加,摇摆运动引起的附加压降和波动幅度随之降低<sup>[7]</sup>。同时,在不存在摇摆运动条件下,低入口欠热度工况下密度波型脉动不易发生;此时,即使施加给系统摇摆运动,复合型脉动也将很弱。

### 3.2 规则复合型脉动的边界

图5为相同热工参数下密度波型脉动和规则复合型脉动的发生边界,二者基本一致。从图5可看出,在相同的热工水力参数下,摇摆参数对复合型脉动的边界影响不明显。这主要是由于复合型脉动的发生取决于密度波型脉动的发生,密度波型脉动的发生边界不受流量波动波谷点的影响,而与实验段入口欠热度及流量波峰点有关。本系统中的摇摆运动对流量波动波谷点的影响大于对流量波动波峰点的影响(图6),图6中的纵坐标为摇摆运动条件下的流量与相同工况下系统不摇摆时流量的比值。

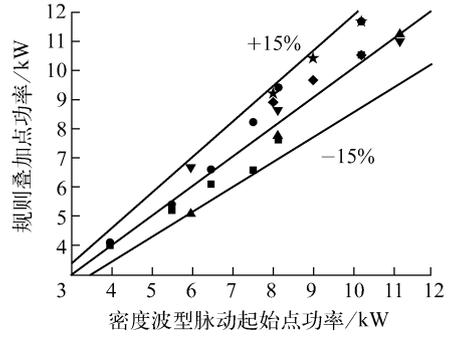


图5 密度波型脉动和规则复合型脉动的起始点  
Fig. 5 Onset of density wave oscillation and regular complex oscillation

振幅 10°: ■——周期 10 s, ●——周期 7.5 s;  
振幅 15°: ◆——周期 10 s, ★——周期 7.5 s;  
振幅 20°: ▲——周期 10 s, ▼——周期 7.5 s

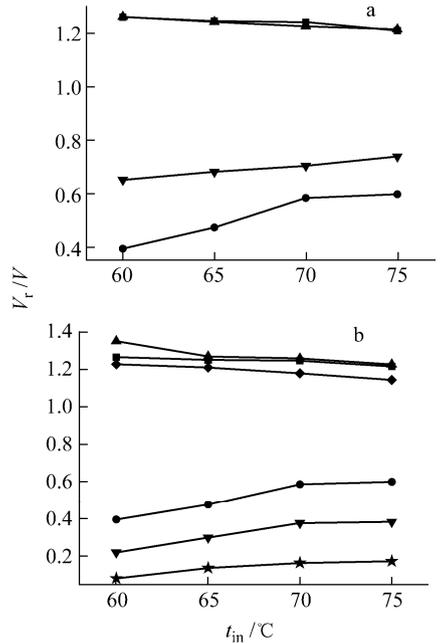


图6 摇摆振幅(a)和周期(b)对波动振幅的影响  
Fig. 6 Effects of rolling amplitude on amplitude (a) and period (b) of fluctuation

a:波峰点, ■——20°, ▲——10°;波谷点, ●——20°, ▼——10°  
b:波峰点, ■——12.5 s, ▲——10 s, ◆——7.5 s;  
波谷点, ●——12.5 s, ▼——10 s, ★——7.5 s

由图6可见,可见最高点流量受摇摆参数影响较小。因此,摇摆引起的波谷型流动不稳定性受摇摆参数的影响较大,而复合型脉动受摇摆参数的影响则较小。

## 4 结论

1) 摇摆造成流量波动,在流量最低点极易发生波谷型两相流动不稳定性。

2) 复合型脉动是摇摆引起的波谷型两相流动不稳定性和密度波型脉动的叠加。复合型脉动可分为两种类型,即规则复合型脉动和不规则复合型脉动。从波谷型两相流动不稳定性发生到规则复合型脉动形成,二者之间存在一过渡区域,即不规则复合型脉动。

3) 规则复合型脉动的周期为摇摆周期和密度波型脉动周期的最小公倍数。

4) 在摇摆运动条件下,自然循环规则复合型脉动的发生边界与相同热工水力参数下自然循环密度波型脉动的边界相近。

5) 复合型脉动的发生边界受摇摆参数的影响较小。复合型脉动的强弱受密度波型脉动强弱的影响。

## 参考文献:

[1] ISHIDA T, YORITSUNE T. Effects of ship motion on natural circulation of deep sea research reactor DRX[J]. Nuclear Engineering and Design, 2002, 215: 51-67.

[2] 杨珏,贾宝山,俞冀阳. 简谐海洋条件下堆芯冷却剂系统自然循环能力分析[J]. 核科学与工程, 2002, 22(3): 199-203.

YANG Jue, JIA Baoshan, YU Jiyang. Analysis of natural circulation ability in PWR coolant system under ocean condition[J]. Chinese Journal of Nuclear Science and Engineering, 2002, 22 (3): 199-203(in Chinese).

[3] 高璞珍,刘顺隆,王兆祥. 纵摇和横摇对自然循环的影响[J]. 核动力工程, 1999, 20(3): 228-231.

GAO Puzhen, LIU Shunlong, WANG Zhaoxiang. Effect of pitching and rolling upon natural circulation[J]. Nuclear Power Engineering, 1999, 20(3): 228-231(in Chinese).

[4] 苏光辉,张金玲,郭玉君. 海洋条件对船用核动力堆余热排出系统特性的影响[J]. 原子能科学技术, 1996, 30(6): 487-491.

SU Guanghui, ZHANG Jinling, GUO Yujun. 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).

[5] 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.

[6] 谭思超,庞凤阁. 摇摆运动引起的波动与自然循环密度波型脉动的叠加[J]. 核动力工程, 2005, 26(2): 140-143.

TAN Sichao, PANG Fengge. The overlapped flow of the flow oscillation caused by rolling motion and the density wave oscillation of natural circulation [J]. Nuclear Power Engineering, 2005, 26(2): 140-143(in Chinese).

[7] 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. Characteristic of single-phase natural circulation under rolling[J]. Nuclear Power Engineering, 2005, 26(6): 554-558(in Chinese).

[8] 谭思超,高璞珍,苏光辉. 摇摆运动条件下自然循环流动的实验和理论研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2007, 28(11): 1 213-1 217.

TAN Sichao, GAO Puzhen, SU Guanghui. Experimental and theoretical study on natural circulation flow under rolling motion condition [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2007, 28(11): 1 213-1 217(in Chinese).

[9] 谭思超,高璞珍,苏光辉. 摇摆运动条件下自然循环温度波动特性的实验和理论研究[J]. 原子能科学技术, 2008, 42(8): 673-677.

TAN Sichao, GAO Puzhen, SU Guanghui. Experimental and theoretical study on characteristics of natural circulation temperature fluctuation under rolling motion condition [J]. Atomic Energy Science and Technology, 2008, 42(8): 673-677(in Chinese).