

套管型自然循环回路不稳定现象分析

吴祥成, 阎昌琪

(哈尔滨工程大学 核安全与仿真技术国防重点学科实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要:为解决熔盐堆排盐罐中熔盐衰变热稳定导出问题, 针对套管型自然循环回路开展了不稳定现象研究实验, 对实验中观察到的现象和获得的测量数据进行了分析。实验结果表明, 中心管对流体预热作用明显, 水箱入口温度较低时流体通过中心管后温升高达 40 °C; 上升段出口液面波动过程中会出现多个波峰, 第 1 个为主峰, 其他为附峰; 附峰的持续时间一般会长于主峰; 水箱入口水温波动频率高于压力等其他参数。不稳定振荡发生时水箱温度均有一定的过冷度。振荡的周期性不明显, 流动存在低频振荡的耦合情况。振荡周期与沸腾延迟时间正向最大偏差为 71%, 负向最大偏差为 37%。

关键词:套管; 自然循环; 不稳定性; 喷泉

中图分类号: TL353

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2016)06-1008-06

doi: 10.7538/yzk.2016.50.06.1008

Instable Phenomenon Analysis of Thimble Tube-type Natural Circulation Loop

WU Xiang-cheng, YAN Chang-qi

(Fundamental Science on Nuclear Safety and Simulation Technology Laboratory,
Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: In order to remove decay heat safely from the drain tank, instability research experiment was carried out in thimble tube-type natural circulation loop. The observed phenomena and collected data were analyzed. The results show that the fluid flowing in the center pipe is preheated obviously. Several wave peaks appear when the liquid level goes up and down at the outlet of the heat transfer tube. The first one is called for main peak. Others are called for subordinate peaks. Duration time of subordinate peaks is often longer than that of main peak. Oscillation frequency of temperature at the inlet is higher than those of other parameters. Water in the tank is subcooled when the oscillations occur. The period of oscillation is not obvious. There exists coupling between low frequency oscillations. The positive maximum deviation between the period of oscillation and boiling delay time is 71%, and the negative maximum deviation is 37%.

Key words: thimble tube; natural circulation; instability; geysering

因具有固有安全性特点(重力驱动),非能动自然循环引起了广泛的关注。沸水堆、熔盐堆的余热排出系统和即将投入应用的新型压水反应堆 AP1000 都广泛采用自然循环过程导出热量^[1-4]。自然循环虽然具有固有安全性的特点,但是相对于强迫循环存在两个缺点:其一,驱动压头小,无泵后只能靠重力压头驱动;其二,自然循环,尤其是两相自然循环,存在更加严重的不稳定现象。Boure 等^[5]在 20 世纪 80 年代对两相流动不稳定性进行了分类。在两相自然循环系统中出现的典型不稳定性有喷泉(Geysering)不稳定性、第一类密度波(Type-I DWO)不稳定性和第二类密度波(Type-II DWO)不稳定性。近年来闪蒸引发的不稳定现象研究较多,但分类并不统一,有些研究将闪蒸引发的不稳定现象归结为密度波不稳定性^[6],有些研究认为闪蒸具有自身的特点,不和其他不稳定性归为同类^[7]。

针对典型两相自然循环回路出现的不稳定现象的研究较多,其不稳定现象的特征、分类、判定已有文献可供参考^[8-9],但对套管型自然循环回路却鲜有可供参考的实验研究成果。目前套管型自然循环回路主要应用在熔盐堆余热排出系统中,而余热导出过程中自然循环回路会出现不稳定现象,换热管局部壁面温度振荡最高可达 25 °C 以上,了解其中发生的不稳定现象特征及类型对衰变热稳定导出具有积极意义。所以,本文将对套管型自然循环回路进行介绍,并对其开展不稳定现象的实验研究。

1 套管型自然循环回路

图 1 为套管型自然循环回路示意图。水箱中的冷却水从中心管向下流动,到底部后折返沿套管的环隙向上流动。套管外侧为输入热源,中心管内流体和环隙流体之间的密度差产生驱动力。美国橡树岭国家实验室所进行的熔盐反应堆试验(MSRE)在排盐罐内采用了类似的套管型自然循环回路^[10],但并未进行详细的不稳定性研究。Sun 等^[4]设计非能动余热排出系统时也采用了类似的结构。

套管型自然循环回路相较于普通的两相自然循环回路有两个显著的特点:1) 冷热源之间高度差小。典型自然循环回路的加热器和冷凝

器安排在不同高度以增大驱动力,但图 1 中冷源(中心管内流体)和热源(环隙内被加热的流体)重心几乎在相同的高度。2) 冷热源之间存在直接的热量传递。中心管内流体在下降过程中会被环隙的热流体加热,而环隙的热流体在上升过程中也会被中心管冷流体冷却。由于这些区别,套管型自然循环回路稳定性波动可能会存在不同的特征。

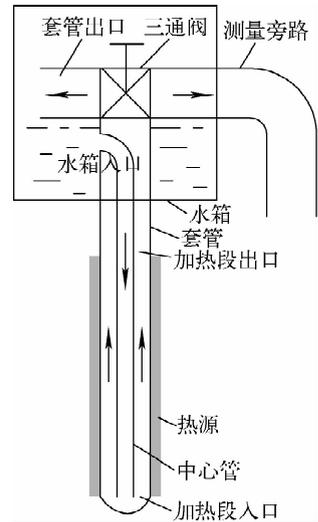


图 1 套管型自然循环回路示意图
Fig. 1 Scheme of thimble tube-type natural circulation loop

2 实验装置

实验系统包含采集系统、加热装置和循环回路。循环回路由套管、中心管、储水箱、三通阀、旁路测量通道等组成(图 1)。循环工质为去离子蒸馏水。套管总长 2.05 m。套管在加热装置内部分内径为 22.4 mm,伸出加热装置后内径扩大为 35 mm。中心管外径保持 12.7 mm 不变。

回路中热源由管式高温炉提供。加热段长度为 1.5 m。高温炉为三区加热,采用 PID 自动调节实现高精度控温。如果忽略高温炉内的陶瓷热电偶测温误差,稳定状态下高温炉内三区之间的温差小于 2 °C。炉膛外包陶瓷纤维绝热材料以维持较低的环境热损失。除此之外,水箱和裸露部分的换热管也包有保温层。水箱内部安装数支电加热器,可实现水箱温度的快速升高。与水箱连接的还有补给水箱和排放阀(图 1 中未画出),较冷的蒸馏水可经过补给水

箱加入到大水箱中。大水箱中水温稳定主要通过补给水箱补充冷水和排放阀排出热水来维持。

由于套管型回路的特殊结构,流量计无法安装在有效的测量位置,因此实验中流量测量采用称重法。图1环隙中折返向上的流体在通过三通阀后向左侧流动,直接回流到水箱中进行下一

次循环。当需要测量流量时,三通阀动作,由右侧通道关闭改为左侧通道关闭,流体沿右侧管道流出储水箱。流出流体被收集后在电子秤上称重测量。电子秤精度为1 g。加热段出口环隙空间的压力由20 kPa的压力传感器测量,精度为0.4%。实验中温度测量均采用一级精度的K型热电偶,热电偶布置位置列于表1。

表1 热电偶布置

Table 1 Arrangement of thermal couples

测量区	热电偶数量	热电偶位置
流体温度	3	中心管入口、环隙入口、加热段出口
中心管外壁温	2	加热段底部、加热段顶部
套管外壁温	5	分别距加热段底部 50、250、650、1 050、1 350 mm

3 实验现象

图2为振荡过程中无量纲化温度和出口压力的波动情况。无量纲化温度 Θ^* 的公式为:

$$\Theta^* = \frac{T - T_0}{T_{\text{sat}} - T_0} \quad (1)$$

其中: T 为温度测量值; T_0 为初始温度; T_{sat} 为饱和水温。冷却水沿中心管下降到套管底部过程中有40℃左右的温升。但冷却水途径环隙的加热段后温度平均值仅升高5℃左右。由此可见,套管型的自然循环回路对冷流体的预热作用(对中心管内流体的预热)非常明显,可显著降低环隙加热段的入口过冷度。普通自然循环回路无预热过程,欲获得预热效果需加装额外的预热器。

气泡的产生与破裂并未对套管内液面产生扰动。水箱中冷却水入口处间歇性地涌出流体,可判断有逆流发生。套管出口液面波动时会有流体涌出到水箱中,液面上升到最高点(出现主高峰)后迅速下降,会再次反弹上升(出现附峰)。附峰的持续时间一般相对主峰要长,且一个波动周期内附峰可能会出现多个。从图2的出口压力波动可看出,观察到的现象和测量结果有较好的对应。另外一个值得注意的特征是水箱入口水温波动的频率较其他测量参数的高,这是因为振荡产生后管道出口处液面会上下波动,进而造成流体在水箱入口处涌入涌出。实验中能观察到在一个波动周期内水箱入口水温峰值会出现1~3次,随着水箱内水温上升,出现次数会逐渐减小。

基于以上的实验现象和测量数据,可对振荡过程做如下概括:初始阶段蓄热,流体处于静止状态,基本无振荡产生,加热段流体和套管壁温逐渐升高;加热段内产生气泡,气泡较小,分散在流体中,由于浮力作用向上运动,在上升过程中与未饱和流体接触会凝结消失,压力出现轻微振荡;蓄热段结束,流体和壁面温度进一步上升,气泡生成速率增大,脱离直径增大,上升过程中聚合形成大气泡,堵塞流动通道。气泡上升推动管道中液面上升,振荡发生;主峰出现后液面迅速回落,由于存在流动惯性,附峰会在主峰后出现;通道内大气弹消失,流动受阻力作用停止,回归蓄热段。由于套管出口位置高于水

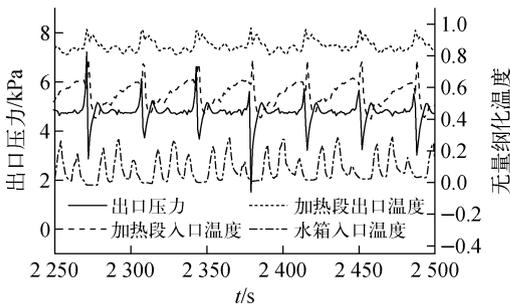


图2 不稳定振荡下的参数波动

Fig. 2 Variation of parameter in oscillation

实验中能观察到套管出口液面的上下波动,波动中的液面会有小气泡冒出并破裂。小

箱液面,不会发生文献[11]中提到的回流现象。

4 实验数据分析

4.1 不稳定边界分析

图3为不稳定工况点分布。中间斜线表示过冷度数与相变数相等点的集合。过冷度高的工况点纵坐标数值较大,沿斜线逐渐向上,而接近饱和的工况点均集中于左下角区域。可注意到,不稳定工况多集中在斜线附近,这主要是自然循环的缘故。自然循环条件下的过冷度数与相变数随水箱入口温度做同向变化。过冷度数与入口温度相关,而相变数主要受加热功率和流量比值的影响。在加热功率不变的情况下,入口温度升高,气泡产生得早,中心管内流体与环隙流体密度差大,驱动压头大,流量会显著提升。例如,水箱内液面距离套管出口7.5 cm时,水箱水温从30℃升高到40℃,流量从0.003 98 kg/s提高到0.004 54 kg/s,升幅12%。随着温度继续升高,流量提升会愈加明显。

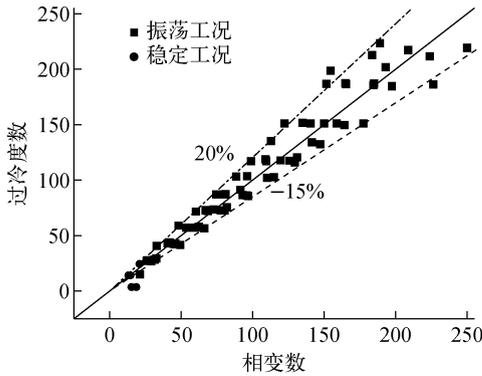


图3 不稳定工况点分布

Fig. 3 Boundary of oscillation

不稳定现象发生时水箱水温均有一定的过冷度。实验中最大过冷度为70℃。斜线上方的不稳定工况点表示流体在回路内可被加热到饱和,而斜线下方的不稳定工况点表示流体始终不能被加热到饱和,流体主流温度一直过冷。稳定工况点多出现在过冷度很低时。

4.2 功率谱分析

功率谱密度(PSD)是一种描述时域信号的离散数据在频域内分布的方法,最早用在流型识别研究中。将采集到的离散的温度信号 $t(T)$ 在有限区间 $(0, T)$ 内做如下变换:

$$\hat{t}(\omega) = \frac{1}{\sqrt{T}} \int_0^T t(x) e^{-i\omega x} dx \quad (2)$$

则可获得温度信号的功率谱密度:

$$PSD(\omega) = \lim_{T \rightarrow \infty} E[|\hat{t}(\omega)|^2] \quad (3)$$

其中: ω 为频率; x 为有限区间内的取值变量; E 表示期望值; i 表示复数的虚部。上述过程可通过编程快速计算。图4为不稳定振荡中的温度信号功率谱密度分布,可看出,加热段入口温度(图4a)和出口温度(图4b)的功率谱密度并不很集中,均未显示出非常强的周期性。统计结果也发现,波峰之间的时间间隔并不完全固定。图4b中0.1 Hz以下可相对明显地观察到几个波峰,说明存在几个低频振荡在时域中耦合叠加在一起的情况。在竖直上升管中,泡状流和环状流功率谱密度为单峰分布,而间歇流为多峰分布。通过分析可知流动为一间歇性的振荡过程,和功率谱数据相吻合。

4.3 不稳定性判定

一些学者提出了通过比较振荡周期和沸腾延迟时间来判定Geysering不稳定性的方法。

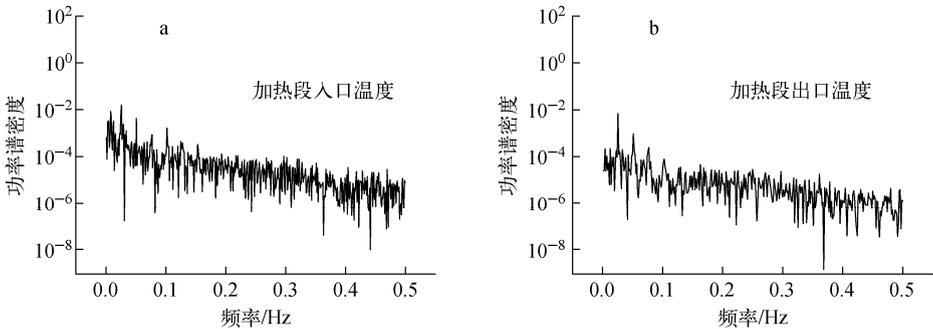


图4 温度信号的功率谱密度分布

Fig. 4 PSD distribution of temperature signal

Geysering 不稳定性的周期一般近似等于延迟时间^[6]。沸腾延迟时间 τ 定义为过冷流体被加热到饱和的时间, 即:

$$\tau = \frac{\rho_{in} c_{p,in} \Delta T_{sub,in}}{q''} \quad (4)$$

其中: ρ 为密度; c_p 为比定压热容; ΔT_{sub} 为过冷度; q'' 为单位体积的加热功率; 下标 in 表示入口。

图 5 为沸腾延迟时间与振荡周期的关系。斜线为振荡周期和延迟时间相等的点的集合, 数据点分布在斜线两侧, 斜线上方偏差的最大值为 71%, 斜线下方偏差的最大值为 37%。沸腾延迟时间与振荡周期偏差不大, 基本符合文献^[6]中的判别条件。

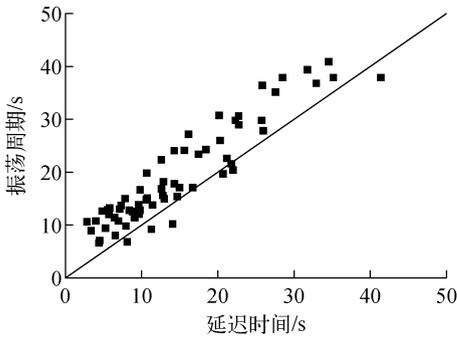


图 5 沸腾延迟时间与振荡周期的关系

Fig. 5 Relation between boiling delay time and oscillation period

相对于典型的喷泉振荡, 本实验出现的振荡在出口处不发生回流, 周期性不明显, 入口温度振荡频率高。Geysering 不稳定振荡通常由 3 个过程构成: 蓄热、喷涌、回流^[12]。本文描述的振荡满足蓄热和喷涌过程, 但水箱中冷流体不会回流, 加热段通道再填充过程由入口处冷流体单独完成。本实验中振荡出现了流量反转, 满足 Geysering 振荡最显著的特征。根据 Kuncoro 等^[13]的实验分析, 如果出口液面存在一个平静阶段和剧烈的喷涌阶段, 无论驱动力是什么, 这种现象就是 Geysering。所以根据上文的分析, 本实验的振荡现象属于 Geysering 不稳定振荡。

5 总结

实验对套管型自然循环回路中出现的不稳

定性进行了分析, 得到下述结论:

1) 流体流经中心管温升较大, 预热作用明显。实验中能观察到逆流现象。套管出口高于水箱液面, 不会发生 Geysering 典型的冷流体回流现象。在经历一个蓄热阶段后振荡发生, 上升段出口液面在出现 2~3 个高峰后受阻力作用迅速回归初始液位。第 1 个出现的波峰为主峰, 其他为附峰。附峰持续的时间一般会长于主峰。水箱入口水温的波动频率高于测量的其他参数。

2) 不稳定振荡发生时水箱水温均有一定过冷度。不稳定振荡周期性并不明显, 功率谱密度为多峰分布, 流动存在低频振荡的耦合情况。

3) 振荡周期与沸腾延迟时间正向最大偏差为 71%, 负向最大偏差为 37%。比较相关学者的研究成果, 可判定本实验出现的振荡为 Geysering 不稳定振荡。

参考文献:

- [1] KURAN S, XU Y, SUN X, et al. Startup transient simulation for natural circulation boiling water reactors in puma facility[J]. Nuclear Engineering and Design, 2006, 236 (22): 2 365-2 375.
- [2] ARITOMI M, CHIANG J H, NAKAHASHI T, et al. Fundamental study on thermo-hydraulics during start-up in natural circulation boiling water reactors (I) [J]. Journal of Nuclear Science and Technology, 1992, 29(7): 631-641.
- [3] 袁添鸿, 于雷, 王川. 全厂断电事故下 AP1000 非能动余热排出系统分析[J]. 原子能科学技术, 2010, 44(增刊): 248-252.
YUAN Tianhong, YU Lei, WANG Chuan. Research on passive residual heat remove system under loss of power[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2010, 44(Suppl.): 248-252(in Chinese).
- [4] SUN L, SUN L, YAN C, et al. Conceptual design and analysis of a passive residual heat removal system for a 10 MW Molten Salt Reactor experiment[J]. Progress in Nuclear Energy, 2014, 70: 149-158.
- [5] BOURE J A, BERGLES A E, TONG L S. Review of two-phase flow instability[J]. Nuclear

- Engineering and Design, 1973, 25(2): 165-192.
- [6] FURUYA M, INADA F, THJJVD H. Flashing-induced density wave oscillations in a natural circulation BWR: Mechanism of instability and stability map[J]. Nuclear Engineering and Design, 2005, 235(15): 1 557-1 569.
- [7] TANIMOTO K, ISHII M, LEE Y S. Examination of transient characteristics of two-phase natural circulation within a Freon-113 boiling/condensation loop[J]. Nuclear Engineering and Design, 1998, 183(1-2): 77-95.
- [8] TONG L L, SHAO G, YUAN K, et al. An experimental study on Geysering phenomena induced by buoyancy in a heating system[J]. Annals of Nuclear Energy, 2014, 63: 129-137.
- [9] ZHANG L, FAN L, HUA M, et al. An indoor experimental investigation of the thermal performance of a TPLT-based natural circulation steam generator as applied to PTC systems[J]. Applied Thermal Engineering, 2014, 62 (2): 330-340.
- [10] ROBERTSON R C. MSRE design and operation report I [R]. Tennessee: US Atomic Energy Commission, 1965.
- [11] 戚展飞, 佟立丽, 曹学武. 加热系统间歇泉流动现象初步实验研究[J]. 核动力工程, 2012, 33 (S1): 64-68.
QI Zhanfei, TONG Lili, CAO Xuewu. Preliminary experimental study on geysering phenomena in heating system[J]. Nuclear Power Engineering, 2012, 33(S1): 64-68(in Chinese).
- [12] OZAWA M, NAKANISHI S, ISHIGAI S, et al. Flow instabilities in boiling channels, Part 2: Geysering[J]. Bulletin of JSME, 1979, 22 (170): 1 119-1 126.
- [13] KUNCORO H, RAO Y F, FUKUDA K. An experimental study on the mechanism of geysering in a closed two-phase thermosyphon[J]. International Journal of Multiphase Flow, 1995, 21 (6): 1 243-1 252.