

立式倒 U 型管蒸汽发生器 倒流现象及初步分析

王 飞,卓文彬,肖泽军,陈炳德

(中国核动力研究设计院 空泡物理和自然循环国家重点实验室,四川 成都 610041)

摘要:文章涉及中国核动力研究设计院自然循环实验装置单相稳态自然循环实验过程中立式倒 U 型管蒸汽发生器(UTSG)模拟体一次侧流体的流动特性。实验观察到:1) UTSG 模拟体进口腔室压力低于出口腔室压力;2) UTSG 模拟体入口腔室温度较热段温度有一陡降。通过对该实验现象的分析可以判定,在单相自然循环工况下,UTSG 模拟体中某些传热管内出现了倒流。实验结果表明,倒流的出现使 UTSG 模拟体自然循环工况下的流动阻力系数较强迫循环工况下的明显增大。

关键词:自然循环;立式倒 U 型管蒸汽发生器;倒流

中图分类号:TL334 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-6931(2007)01-0065-04

Phenomena and Analysis of Reversal Flow in Vertically Inverted U-Tube Steam Generator

WANG Fei, ZHUO Wen-bin, XIAO Ze-jun, CHEN Bing-de

(National Key Laboratory of Bubble Physics and Natural Circulation,
Nuclear Power Institute of China, Chengdu 610041, China)

Abstract: The experimental results of flow characteristics of vertically inverted U-tube steam generator (UTSG) primary side fluid under single-phase steady state natural circulation condition, which were conducted on natural circulation test facility in Nuclear Power Institute of China (NPIC), were presented. Following phenomena were observed from experiment: 1) The pressure of UTSG inlet plenum is lower than that in exit plenum; 2) The inlet plenum temperature of UTSG is sharply lower than that in hot leg. By analysis, reversal flow in some U-tubes of UTSG under single-phase natural circulation condition can be deduced. Experiment result shows that the flow resistance coefficient of UTSG under natural circulation is obviously larger than that under forced circulation as the occurrence of flow reversal in some U-tubes of UTSG under single-phase natural circulation condition.

Key words: natural circulation; vertically inverted U-tube steam generator; flow reversal

在压水堆(PWR)事故工况,诸如失水事故(LOCA)、主循环泵断电或机械故障引起的失流事故(LOFA)中,利用自然循环导出堆芯的衰变余热对保证反应堆的安全至关重要。国外一些核电发达国家建造了全高全压整体模拟实验装置及降高降压整体模拟实验装置,进行了单相、两相自然循环及回流冷凝等实验研究^[1-4]。

在通常的PWR理论分析和系统程序计算中,对立式倒U型管蒸汽发生器(UTSG)管侧一般采用一维模型,且将管束用1个流道等效,无法真实地反映自然循环工况下UTSG中的倒流及阻力系数增大的现象,影响了系统自然循环能力理论分析和程序计算的准确性。因此,有必要对UTSG在自然循环工况下出现倒流现象的产生机理、规律以及倒流对系统自然循环特性的影响进行深入的实验和理论研究。

本文描述在中国核动力研究设计院自然循环实验装置单相稳态自然循环特性实验过程中观察到的UTSG模拟体中某些传热管内出现倒流现象的典型特征,并对该现象进行机理及影响分析。

1 实验装置

1.1 实验回路

实验装置由2个回路组成(图1),工作介质为去离子水。一回路包括反应堆模拟体(PV)和2条对称的环路。电加热式稳压器(PRZ)通过波动管与1条环路的热段相连。每条环路由UTSG模拟体、主循环泵、文丘里流量计及管道、阀门组成。PV发热区由电加热元件组成;二回路由UTSG二次侧、换热器、冷凝水循环泵及管道、阀门组成。

1.2 UTSG模拟体

UTSG模拟体下部为40根倒U型的传热管,上部为汽水分离器和干燥器(图2)。

UTSG模拟体内测点布置如下:进出口腔室间压降测点1个;进出口腔室流体温度测点各1个;选择长管、中长管、短管各1根,分别在这3根管内轴向非等间距布置流体温度测点10个,相应位置管外壁温度测点10个,二次侧轴向流体温度测点9个。

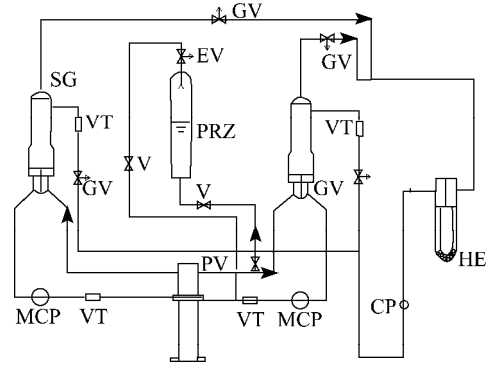


图1 回路系统流程简图

Fig. 1 Schematic diagram of loop system

PV——反应堆模拟体;MCP——循环泵;
VT——文丘里管;SG——蒸汽发生器;PRZ——稳压器;
GV——气动阀;CP——冷凝水循环泵;V——手动阀;
HE——换热器;EV——电磁阀

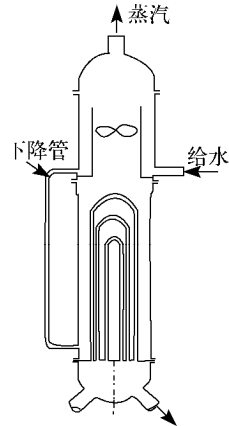


图2 UTSG示意图

Fig. 2 Schematic diagram of UTSG

2 实验结果

维持一回路系统压力、PV进出口平均温度及UTSG模拟体给水温度基本不变,进行了编号为run0622和run0817的两次单相稳态自然循环实验。两次实验的差别仅在于一回路泵路的阻力系数不同。实验得到,随着PV加热功率的增加,一回路单相自然循环流量增加。UTSG模拟体进出口腔室间压降 Δp ($\Delta p = p_{\text{inlet}} - p_{\text{outlet}}$)随自然循环流量的变化示于图3。由图3可见,在自然循环工况下, Δp 为负值,且随一回路自然循环流量的增加,入口腔室的压力比出口腔室的压力低得更多。

由图3还可看到,对同一自然循环流量,随

着泵路阻力系数的增加,UTSG 模拟体进出口腔室间压降 Δp 的负值更大。

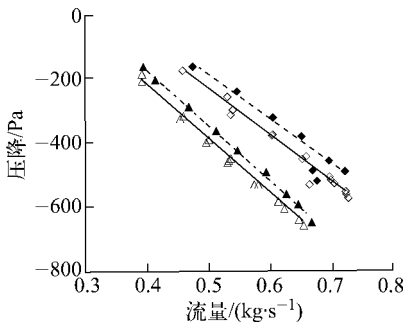


图3 单相自然循环工况下回路流量与 UTSG 进出口腔室间压降的关系

Fig. 3 Pressure drop between UTSG inlet and exit plenum as well as primary loop single-phase natural circulation flow rate
◇——run0622(SG1); △——run0817(SG1);
◆——run0622(SG2); ▲——run0817(SG2)

在实验 run0622 中,环路 I 上的 UTSG 模拟体进出口腔室及一回路冷、热段温度测量结果示于图 4。

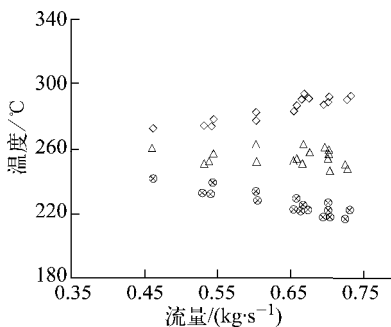


图4 UTSG 进出口腔室及一回路冷热段温度与自然循环流量的关系(run0622)

Fig. 4 Temperatures of UTSG inlet and exit plenum as well as hot and cold leg vs. natural circulation flow rate (run0622)
◇——环路 I 热段温度; △——SG1 入口腔室温度;
×——环路 I 冷段温度; ○——SG1 出口腔室温度

从图 4 可看出,在自然循环工况下,UTSG 模拟体入口腔室温度明显比热段温度低,且随着一回路自然循环流量的增加温差增大明显,甚至超过了 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$; UTSG 模拟体出口腔室温度与冷段温度几乎相等。尽管 UTSG 入口腔

室温度测量值(本实验中只有 1 个温度测点)不能代表入口腔室的平均温度,热电偶安装的位置对测量结果有很大的影响,但现有的测量结果仍显示入口腔室内有冷源存在,而这一冷源就是从出口腔室通过传热管倒流回入口腔室的相对较冷的工作介质。

3 现象分析

据文献^[1-5]报道,国外对 PWR 整体模拟实验装置中 UTSG 在自然循环工况下各传热管内流动的不均匀性现象已进行过实验及理论研究,包括一回路单相自然循环及两相自然循环的情况,相关实验涉及一回路小破口失水事故及 UTSG 给水丧失事故的研究。实验及理论分析表明,在自然循环工况下,立式倒 U 型管蒸汽发生器某些传热管(通常是阻力较大的管子)内会出现倒流,即由蒸汽发生器出口腔室向入口腔室的流动。出现倒流时通常会伴随如下现象:1) 传热管内的温度基本不变并与二次侧饱和温度接近;2) 入口腔室流体温度较热段温度有一陡降;3) 出口腔室的压力略高于入口腔室的压力。

J. J. Jeong^[5]采用一维、积分动量方程的方法,对 UTSG 在单相自然循环及两相自然循环工况下 U 型管进出口压降 Δp 及其分量,包括提升压降 Δp_e 、不可逆损失压降 Δp_r (忽略加速压降 Δp_a)与管内流量(\dot{m})的关系进行了分析。结果表明,随着流量从零开始增加, Δp 为负值且不断减少,即出现负斜率区;随着流量继续增加, Δp 不断增加,由负值变为正值,亦即在低流量工况下, Δp 有一负的极小值(图 5)。从 U 型管内的流动特性也可得出,在低流量区,尽管 Δp 为负值,但仍可维持正向流动。如图 6 所示,UTSG 中长管(阻力较大管)的流动特性曲线中极小值点的 Δp 的绝对值比短管的小,因此,随着 UTSG 进出口腔室间压降的减小,长管内首先出现流量漂移(静态流动不稳定性),导致长管内首先出现倒流。该分析从机理上揭示出 UTSG 中某些传热管内出现倒流是在低流量区(如自然循环)静态流动不稳定性的结果,并解释了长管更易出现倒流的原因。对 U 型管瞬态积分动量方程微扰线性化分析,还可得到 UTSG 中出现静态流动不稳定性时的

临界流量值。即当 1 次侧流量大于该临界流量值时, U 型管束内的流动是稳定的, 反之, 则出现流量的静态漂移。

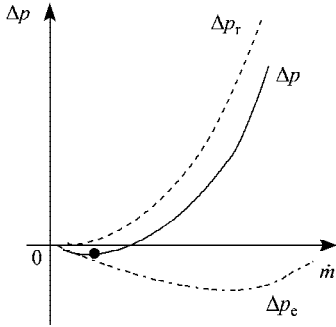


图 5 UTSG 中 U 型管的流动特性曲线

Fig. 5 Flow characteristic curves of U-tube in UTSG

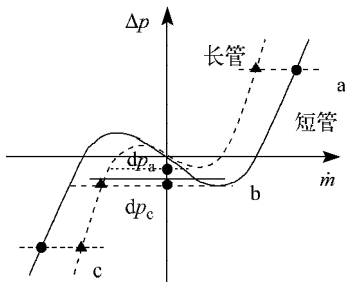


图 6 UTSG 中长管与短管流动特性曲线

Fig. 6 Flow characteristic curves for long and short tube in UTSG

在本实验装置的自然循环工况时观察到了前述的现象 2) 和 3), 未观察到现象 1)。这可能是由于布置温度分布测点的 3 根传热管中恰好没有倒流的缘故。

从上面的现象及分析可以判定: 在单相自然循环工况下, 本实验装置 UTSG 模拟体中某些传热管内发生了倒流。

应该指出, UTSG 在自然循环工况下某些传热管内出现倒流时, 一般不会对反应堆堆芯传热构成威胁。因为自然循环工况的堆芯功率较低, 尽管由于 UTSG 某些传热管内出现倒流而使 UTSG 的有效传热面积减少, 但由于 UTSG 的传热面积是按强迫循环额定功率设计的, 对工作在功率水平较低的自然循环工况而言, 有很大的裕量, 因此, UTSG 在自然循环工况下某些传热管内出现倒流时, 不会危及堆

芯功率的导出。

但是, 倒流的出现使 UTSG 中正向流动管内的流速增加, 正向的总流通截面积减小; 倒流流量在入口腔室内与热段来流进行复杂的混合、耗散使 UTSG 自然循环工况下的流动阻力系数较强迫循环工况明显增大。实验结果表明, UTSG 模拟体自然循环工况下的阻力系数较强迫循环工况增大了约 3 倍。

4 结论

通过对单相稳态自然循环实验过程中观察到的 UTSG 模拟体相关实验现象的分析可以判定, 在单相自然循环工况下, UTSG 模拟体中某些传热管内出现了倒流。这一现象是 UTSG 在自然循环工况下(表现为蒸汽发生器一次侧流量小、流体进出口温差大)的 1 种特有的物理现象, 其实质是 U 型管流动特性曲线在自然循环工况下出现负斜率区而产生的 1 种流量漂移, 属静态流动不稳定性现象。实验结果表明, 倒流的出现使 UTSG 自然循环工况下的流动阻力系数较强迫循环工况明显增大。

参考文献:

- [1] LEE C H, CHANG Y H, SU S J. Investigation of PWR natural circulation at INER integral system test facility[C]. [S. l.]: NURETH-6, 1993: 297-304.
- [2] KUKITA Y, TASAKA K. Single-phase natural circulation in pressurized water reactor under degraded secondary cooling conditions[R]. [S. l.]: HTD, 1989.
- [3] KUKITA Y, NAKAMURA H, TASAKA K. Nonuniform steam generator U-tube flow distribution during natural circulation tests in ROSA-IV large scale test facility[J]. Nuclear Science and Engineering, 1988, 99: 289-298.
- [4] SANDERS J. Stability of single phase natural circulation with inverted U-tube steam generators [J]. ASME J Heat Transfer, 1988, 110: 735-742.
- [5] JEONG J J, HWANG M, LEE Y J, et al. Single- and two-phase flow characteristics in the primary side of a U-tube steam generator[C]. [S. l.]: NURETH-10, 2003: 1-12.