

# 蒸汽发生器 U 型管低含气率 两相倒流现象研究

储 玺, 陈文振, 郝建立, 章 德

(海军工程大学 核科学技术学院, 湖北 武汉 430033)

**摘要:**针对立式倒 U 型管自然循环蒸汽发生器传热管内的两相倒流现象, 基于均相流模型, 建立了 U 型管内低含气率两相流动传热理论模型, 给出了 U 型管的进出口压降-质量流量曲线, 分析了 U 型管内出现两相倒流现象的机理, 研究了二次侧流体温度和入口含气率对倒流现象的影响规律, 并与单相倒流进行了对比。利用 RELAP5/MOD 3.3 程序对相同条件下的倒流问题进行了计算。研究表明, 提高蒸汽发生器二次侧工作压力可减少倒流, 两相流入口含气率越高, 倒流越易发生, 两相流较单相流在 U 型管内更易倒流。

**关键词:**两相流; 倒流; 蒸汽发生器; U 型管

**中图分类号:** TL334

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-6931(2018)07-1276-06

**doi:** 10.7538/yzk.2017.youxian.0701

## Investigation of Two-phase Reverse Flow in U-tube under Low Mass Quality Condition

CHU Xi, CHEN Wenzhen, HAO Jianli, ZHANG De

(College of Nuclear Science and Technology, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

**Abstract:** The two-phase reverse flow phenomenon may occur in the inverted U-tubes of steam generator (SG) for natural circulation. A theoretical model of flow and heat transfer for two-phase flow in U-tubes based on the homogenous flow model was established in this paper. A pressure drop-mass flow curve was derived to investigate the mechanisms of two-phase reverse flow in U-tubes. The effects of inlet mass quality and fluid temperature in secondary side on the reverse flow were also analyzed. Then the theoretical results were verified by the RELAP5/MOD 3.3 codes. The research shows that increasing the SG secondary side pressure may reduce reverse flow phenomenon in U-tubes, and the phenomenon more likely occurs when the inlet mass quality increases.

**Key words:** two-phase flow; reverse flow; steam generator; U-tube

收稿日期: 2017-11-13; 修回日期: 2018-03-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11402300, 11502298); 中国核动力研究设计院核反应堆系统设计技术重点实验室基金资助项目(HDY-2015004); 哈尔滨工程大学核安全与仿真技术国防重点学科实验室基金资助项目(2015A041)

作者简介: 储 玺(1990—), 男, 安徽安庆人, 博士研究生, 核科学与技术专业

网络出版时间: 2018-04-25; 网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2044.TL.20180425.0959.010.html>

自然循环能力是反应堆固有安全性的重要标志<sup>[1]</sup>。当主冷却剂泵停止运行时,自然循环运行方式可将压水反应堆的热量从堆芯载出,传递给蒸汽发生器二次侧,但由于自然循环仅依靠冷热流体的密度差与位差形成驱动力,其流量相比于强迫循环时低得多。当自然循环工况出现失水事故时,蒸汽发生器一次侧热段可能产生部分蒸汽,出现两相自然循环现象<sup>[2-3]</sup>。

立式倒 U 型管蒸汽发生器的部分传热管在自然循环运行工况下,可能发生倒流现象,对反应堆安全带来不利影响。U 型管内的倒流现象属于水动力学静态流动不稳定性,又称为莱迪内格(Ledinegg)流量漂移<sup>[4-5]</sup>。Kukita 等<sup>[6]</sup>针对自然循环整体实验台架上蒸汽发生器内流动不均匀现象进行了研究,结果表明,随着一次侧冷却剂装量的不断减少,U 型管内会出现单相和两相倒流以及回流冷凝,这些流动模式可能同时存在于不同长度的 U 型管内。Jeong 等<sup>[7]</sup>针对上述实验现象建立了 U 型管内单相和两相倒流理论模型,通过分析 U 型管的进出口压降-流量曲线,得出了单相和两相流动的稳定性准则。随后,针对 U 型管内的单相倒流问题,学者们开展了较多的理论分析<sup>[8-10]</sup>、数值模拟<sup>[11-12]</sup>和实验研究<sup>[13-15]</sup>,得到了单相倒流发生机理、临界条件和影响因素等重要结果。但目前对于 U 型管内两相倒流特性的研究仅局限于实验观察到的现象和初步的理论分析,对于其发生特点和影响因素的研究尚未见报道。

本文基于均相流模型,通过建立 U 型管内低含气率两相流动传热理论模型,分析 U 型管内出现两相倒流现象的机理,研究二次侧流体温度和入口含气率对倒流现象的影响,并与单相倒流进行对比。利用 RELAP5/MOD 3.3 程序对蒸汽发生器一次侧进行建模计算,与理论结果进行对比分析。

## 1 理论模型

在低含气率区域,两相流的流动型式主要表现为泡状流,其流动特性可用一维均相流模型来研究,当两相流体进入 U 型管后,会被逐渐冷却为单相流体,假设两相段长度为  $L_2$ ,且  $L_2 < H$ ,  $H$  为 U 型管高度, $L_2$  计算式<sup>[7]</sup>可表示为:

$$L_2 = \frac{x_{in} h_{fg} M}{\pi d_o \alpha_2 (T_{sat}^{pri} - T_{sat}^{sec})} \quad (1)$$

式中: $x_{in}$ 为入口含气率; $h_{fg}$ 为汽化潜热,J/kg; $M$ 为质量流量,kg/s; $d_o$ 为 U 型管外径,m; $\alpha_2$ 为 U 型管内两相流体与管外流体的总换热系数,W/(m<sup>2</sup>·K); $T_{sat}^{pri}$ 和  $T_{sat}^{sec}$ 分别为一次侧和二次侧流体温度,K。

对于 U 型管内单相流体,基于 Boussinesq 假设,管内流体密度变化可表示为温度的函数,其沿管程分布<sup>[9]</sup>为:

$$\rho_1(s) = \rho_0 \left[ 1 - \beta (T_{sat}^{pri} - T_{sat}^{sec}) e^{-\frac{\xi}{M}(s-L_2)} \right] \quad (2)$$

式中: $\rho_1$ 为 U 型管内单相流密度,kg/m<sup>3</sup>; $\rho_0$ 为参考密度,取二次侧饱和温度下一次侧单相流体的密度,kg/m<sup>3</sup>; $\beta$ 为热膨胀系数; $\xi = \pi d_o \alpha_1 / c_p$ , $\alpha_1$ 为 U 型管内单相流体与二次侧流体的总换热系数,W/(m<sup>2</sup>·K), $c_p$ 为比定压热容,J/(kg·K); $s$ 为 U 型管沿流动方向的位置坐标。

两相流体密度沿管程分布<sup>[7]</sup>为:

$$\rho_2(s) = \frac{1}{\nu_f + x_{in} \nu_{fg} - \frac{\pi d_o \alpha_2 (T_{sat}^{pri} - T_{sat}^{sec}) \nu_{fg} h_{fg} s}{M}} \quad (3)$$

式中: $\rho_2$ 为 U 型管内两相流密度,kg/m<sup>3</sup>; $\nu_f$ 为饱和水比容,m<sup>3</sup>/kg; $\nu_{fg} = \nu_g - \nu_f$ , $\nu_g$ 为饱和蒸汽比容,m<sup>3</sup>/kg。

分别将式(2)和(3)沿管程进行积分,可得单相流平均密度:

$$\bar{\rho}_1 = \frac{\int_{L_2}^L \rho_1(s) ds}{L - L_2} \quad (4)$$

式中, $L$ 为 U 型管长度。

两相流平均密度为:

$$\bar{\rho}_2 = \frac{\int_0^{L_2} \rho_2(s) ds}{L_2} \quad (5)$$

U 型管上升段平均密度为:

$$\bar{\rho}_{up} = \frac{\int_0^{L_2} \rho_2(s) ds + \int_{L_2}^H \rho_1(s) ds}{H} \quad (6)$$

U 型管下降段平均密度为:

$$\bar{\rho}_{down} = \frac{\int_H^{2H} \rho_1(s) ds}{H} \quad (7)$$

研究表明,U 型管内两相流体的倒流现象发生在其进出口压降-质量流量曲线的负斜率

区,其进出口压降  $\Delta p$  主要包含单相摩擦压降  $\Delta p_{f1}$ 、两相摩擦压降  $\Delta p_{f2}$ 、重力压降  $\Delta p_g$  以及弯管段的形阻压降  $\Delta p_{form}$  [16]。

$$\Delta p = \Delta p_{f1} + \Delta p_{f2} + \Delta p_g + \Delta p_{form} \quad (8)$$

$$\Delta p_{f1} = \frac{1}{2} f_1 \frac{L - L_2}{d_i} \frac{M^2}{\rho_1 A^2} \quad (9)$$

$$\Delta p_{f2} = \frac{1}{2} f_2 \frac{L_2}{d_i} \frac{M^2}{\rho_2 A^2} \quad (10)$$

$$\Delta p_g = (\bar{\rho}_{up} - \bar{\rho}_{down}) g H \quad (11)$$

$$\Delta p_{form} = \frac{1}{2} K \frac{M^2}{\rho_1 A^2} \quad (12)$$

式中:  $f_1$  和  $f_2$  分别为单相和两相摩擦阻力系数;  $d_i$  为 U 型管内径, m;  $A$  为 U 型管流通面积,  $m^2$ ;  $g$  为重力加速度,  $m/s^2$ ;  $K$  为 U 型管弯管形状阻力系数。

结合式(8)~(12)即可得到 U 型管两相进出口压降-质量流量表达式,若取  $x_{in} = 0$ ,则为单相流动情况。

## 2 理论计算与分析

本文以文献[6]中的 LSTF 热工水力台架蒸汽发生器为研究对象。该台架按照西屋某型压水反应堆容积的 1/48 建造,高度与该堆型保持一致,台架包含 2 个一回路系统,每个回路有 1 台蒸汽发生器,每台蒸汽发生器包含 9 种不同长度共 141 根 U 型传热管,传热管内径和外径分别为 19.6 mm 和 25.4 mm,蒸汽发生器一次侧和二次侧正常工作压力分别为 15.6 MPa 和 6.5 MPa。U 型管尺寸列于表 1 [6]。

表 1 U 型管尺寸

Table 1 Parameter of U-tube

类型 编号	弯管半径 $R_u/mm$	直管长度 $H/mm$	数目	标识
1	51	9 440	21	短管
2	83	9 591	19	
3	116	9 741	19	
4	148	9 892	19	
5	181	10 042	17	中间管
6	213	10 193	15	
7	246	10 343	13	
8	278	10 494	11	
9	311	10 644	7	长管

基于前文推导的理论模型,以表 1 中 9 号 U 型管作为研究对象。图 1 为一、二次侧正常工作压力下,U 型管入口含气率  $x_{in} = 0$  和  $x_{in} = 0.05$  时的进出口压降-质量流量曲线,图中的流动阻力压降包含摩擦压降和形阻压降。由图 1 可看出,单相和两相重力压降均为负值,这是由于 U 型管上升段流体密度小于下降段,且两相流动条件下,上升段与下降段的密度相差更大,导致单相重力压降明显高于两相重力压降。又由于是低含气率条件,两相流动阻力压降略高于单相流动阻力压降。流动阻力压降与重力压降叠加后的总压降随着质量流量的降低,先减小,后增大。总压降曲线存在负斜率区,即流动不稳定工作区域。曲线拐点(图 1 中 A 点和 B 点)对应的流量和压降为该 U 型管发生倒流时的临界质量流量和临界压降。由图 1 还可看出,A 点对应的质量流量小于 B 点对应的质量流量,则在蒸汽发生器一次侧入口质量流量逐渐降低的过程中,该 U 型管内的两相流动较单相流动先达到倒流发生的临界点,即 U 型管内两相流较单相流更易发生倒流。

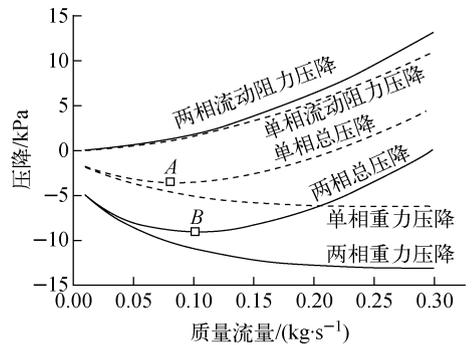


图 1 U 型管压降-质量流量曲线

Fig. 1 Pressure drop-mass flow rate curve of U-tube

图 2 为 U 型管二次侧流体温度为正常工作压力对应的饱和温度时,入口含气率对倒流临界质量流量和临界压降的影响。由图 2 可看出,临界质量流量随入口含气率的升高而增大,临界压降则随入口含气率的升高而降低。则在蒸汽发生器一次侧入口流量逐渐降低的过程中,两相流含气率越高,越易发生倒流。

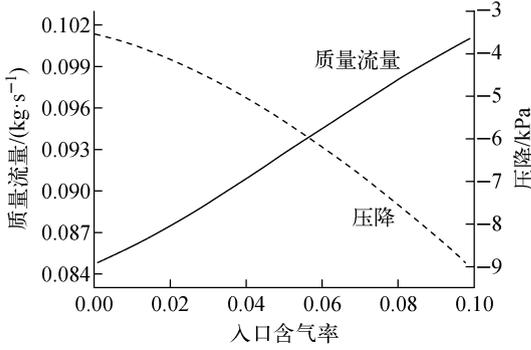


图 2 入口含气率对倒流临界压降与临界质量流量的影响

Fig. 2 Effect of inlet mass quality on critical pressure drop and critical mass flux

图 3 为二次侧流体温度对单相和两相倒流临界质量流量和临界压降的影响,其中 U 型管入口含气率  $x_{in}=0.05$ 。在相同二次侧温度条件下,两相流体的临界质量流量始终大于单相流体,两者均随二次侧流体温度的升高而降低,当蒸汽发生器一次侧流量逐渐降低时,二次侧流体温度越高,U 型管内出现倒流的可能性越小,无论是单相流还是两相流,若提高蒸汽发生器二次侧的工作压力,对于减少 U 型管内流体倒流均有一定的促进作用。在相同二次侧温度条件下,U 型管内单相流的倒流临界压降高于两相流,这是由于 U 型管单相流的进出口总压降大于两相流。

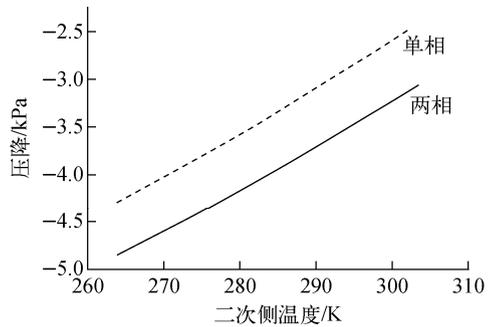
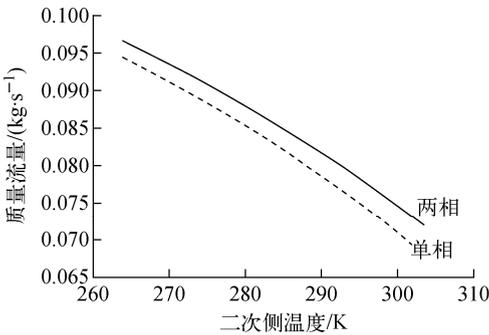


图 3 二次侧温度对倒流临界质量流量和临界压降的影响

Fig. 3 Effect of secondary side temperature on critical mass flux and critical pressure drop

### 3 RELAP5 分析

利用系统分析程序 RELAP5/MOD 3.3 对前文介绍的蒸汽发生器一次侧进行了建模,其中,对于 U 型管束的控制体划分借鉴文献[11]提出的新型划分方式,即按照 U 型管长度的不同对 U 型管束进行控制体划分,每类长度 U 型管划分为 1 个管型部件,沿流动方向划分 22 个控制体。蒸汽发生器进出口腔室各划分为 1 个控制体。经验证,这种控制体划分方式能较好地模拟 U 型管内的正流流量和倒流流量<sup>[11]</sup>。由于二次侧流体大部分处于饱和沸腾状态,所以假设 U 型管外壁温为二次侧工作压力下的饱和温度<sup>[7]</sup>。

模拟蒸汽发生器一次侧质量流量  $M$  在 0~2 000 s 的时间内从 20 kg/s 线性下降至 5 kg/s 时,蒸汽发生器 U 型管内的流动情况。通过改变入口含气率和 U 型管外壁温,分析入

口含气率和二次侧流体温度对倒流产生的影响,结果列于表 2、3。

表 2 入口含气率对倒流的影响

Table 2 Effect of inlet mass quality on reverse flow

$x_{in}$	倒流临界流量/ ( $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ )	倒流管 数目	最终倒流 流量份额/%
0.00	8.28	2	32.92
0.01	8.92	2	33.45
0.03	11.18	2	34.23
0.05	12.62	3	53.05
0.07	12.77	3	54.12
0.09	13.75	3	55.15

注:  $p_{sec}=6.5 \text{ MPa}$

由表 2 可看出,随着 U 型管入口含气率的升高,倒流临界流量逐渐升高,即倒流越易发

生,同时倒流管数目有增多的趋势,最终倒流流量占总流量的份额逐渐增大。另外,两相流较单相流更易发生倒流。

由表3可看出,随着蒸汽发生器二次侧流体温度的升高,倒流临界流量逐渐降低,倒流管数目呈减少趋势,最终倒流流量占总流量的份额也逐渐减小,则提高二次侧工作压力可有效减少倒流,这与理论分析的结果相符。

表3 二次侧流体温度对倒流的影响

Table 3 Effect of secondary side temperature on reverse flow

$T_{\text{sat}}^{\text{sec}}/K$	倒流临界流量/ ( $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ )	倒流管 数目	最终倒流 流量份额/%
537.09	13.84	3	56.81
548.74	12.91	3	54.29
558.98	12.34	3	51.74
568.16	11.80	3	49.11
576.50	11.41	2	36.01

注: $x_{\text{in}}=0.05$

## 4 总结

通过对蒸汽发生器U型管内低含气率两相倒流现象进行理论计算和RELAP5分析,得出以下结论。

1) 两相自然循环工况下,部分U型管内可能存在倒流,两相倒流发生的机理与单相的相同,但在蒸汽发生器一次侧流量逐渐降低的过程中,U型管内两相倒流较单相倒流更易发生。

2) U型管入口两相流体的含气率越高,U型管内发生倒流的临界质量流量越大,则倒流发生的可能性随含气率的上升而增大。

3) 二次侧流体温度越高(二次侧工作压力越高),U型管内发生倒流的临界质量流量越小,则提高二次侧工作压力可有效减少倒流。

## 参考文献:

[1] IAEA. Natural circulation data and methods for advanced water cooled nuclear power plant designs, IAEA-TECDOC-1281[R]. Vienna: IAEA, 2002.

[2] 周润彬,李凤臣,许国华,等. PWR冷管段1%小

破口失水事故实验研究[J]. 原子能科学技术, 1998,32(1):9-15.

ZHOU Runbin, LI Fengchen, XU Guohua, et al. Experimental investigation on 1% small break loss-of-coolant accident of pressurized water reactor cold leg [J]. Atomic Energy Science and Technology, 1998, 32(1): 9-15(in Chinese).

[3] KOUHIA V, RIIKONEN V, KAUPPINEN O P, et al. Benchmark exercise on SBLOCA experiment of PWR PACTEL facility[J]. Annals of Nuclear Energy, 2013, 59: 149-156.

[4] 章德,陈文振,王少明,等. 自然循环过渡过程UTSG一次侧倒流特性研究[J]. 原子能科学技术,2010,44(增刊):181-186.

ZHANG De, CHEN Wenzhen, WANG Shaoming, et al. UTSG primary side reverse flow during natural circulation transition process[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2010, 44(Suppl.): 181-186(in Chinese).

[5] 王飞,卓文彬,肖泽军,等. 立式倒U型管蒸汽发生器倒流现象及初步分析[J]. 原子能科学技术, 2007,41(1):65-68.

WANG Fei, ZHUO Wenbin, XIAO Zejun, et al. Phenomena and analysis of reversal flow in vertically inverted U-tube steam generator[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2007, 41(1): 65-68(in Chinese).

[6] 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.

[7] JEONG J J, HWANG M, LEE Y J, et al. Non-uniform flow distribution in the steam generator U-tubes of a pressurized water reactor plant during single and two-phase natural circulations[J]. Nuclear Engineering and Design, 2004, 231: 303-314.

[8] 郝建立,陈文振,王少明. 自然循环蒸汽发生器倒U型管内倒流现象影响因素研究[J]. 原子能科学技术,2013,47(1):65-69.

HAO Jianli, CHEN Wenzhen, WANG Shaoming. Investigation on factors affecting reverse flow in inverted U-tubes of steam generator under natural circulation[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2013, 47(1): 65-69 (in Chinese).

- [9] HAO J L, CHEN W Z, ZHANG D. Effect of U-tube length on reverse flow in UTSG primary side under natural circulation[J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2013, 56: 66-70.
- [10] WATANABE T, ANODA Y, TAKANO M. Stability of single-phase natural-circulation flows in steam generator U tubes[J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2013, 60: 344-349.
- [11] 王川,于雷. 自然循环蒸汽发生器倒 U 型管内单相流体倒流特性研究[J]. *核动力工程*, 2011, 32(1): 58-62.  
WANG Chuan, YU Lei. Investigation on single phase water reverse flow in inverted U-tubes of steam generator under condition of natural circulation[J]. *Nuclear Power Engineering*, 2011, 32(1): 58-62(in Chinese).
- [12] HAO J L, CHEN W Z, WANG S M. Flow instability analysis of U-tubes in SG based on CFD method[J]. *Progress in Nuclear Energy*, 2014, 70: 134-139.
- [13] HU G J, YU L, CHEN W Z, et al. Experimental and numerical investigations on the reverse flow phenomena in UTSGs[J]. *Progress in Nuclear Energy*, 2016, 92: 147-154.
- [14] HAO J L, CHEN W Z, HU G J, et al. Experimental research on reverse flow critical point among parallel U-tubes in SG[J]. *Progress in Nuclear Energy*, 2017, 98: 59-70.
- [15] CHU X, CHEN W Z, HAO J L, et al. Experimental and theoretical investigations on effect of U-tube inlet and secondary temperatures on reverse flow inside UTSG[J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2017, 110: 1 073-1 080.
- [16] 陈文振,于雷,郝建立. 核动力装置热工水力[M]. 北京:中国原子能出版社,2013.