

低流量条件下倒 U 型管式蒸汽发生器 流动特性研究

张 勇, 宋小明, 黄 伟

(中国核动力研究设计院 核反应堆系统设计技术国家级重点实验室, 四川 成都 610041)

摘要:采用理论分析方法和计算流体动力学(CFD)方法对倒 U 型管式蒸汽发生器一次侧内的流动特性进行分析研究。从理论上给出倒 U 型管内压降关系式。分析表明,低流量时,适当条件下倒流可能出现在长管或短管。得出了出现倒流的必要条件:低流量,一、二次侧存在温差,以及 U 型管存在高度差。同时采用 CFD 方法验证了理论分析的结果。

关键词:倒 U 型管;流动特性;低流量;计算流体动力学

中图分类号:TK124

文献标识码:A

文章编号:1000-6931(2007)S0-0044-05

Research on Flowing Characteristics in Vertical Inverted U-Bend Tube Steam Generator Under Low Flow Rate Condition

ZHANG Yong, SONG Xiao-ming, HUANG Wei

(National Key Laboratory of Reactor System Design Technology,
Nuclear Power Institute of China, Chengdu 610041, China)

Abstract: The theoretical analysis and computational fluid dynamics (CFD) method are used to study on the flowing characteristics in the primary side of a vertical, inverted U-bend tube steam generator(UTSG) in this paper. The theoretical analysis gives the pressure drop relations in the tube. The reversal flow will be occurred in long or short U-bend tube under the specific conditions. The necessary condition for reversal flow is low flow rate, temperature difference between the primary side and second side, and height difference between U-bend tubes. And the CFD method is used to validate the theoretical analysis result.

Key words: vertical inverted U-bend tube; flowing characteristics; low flow rate; computational fluid dynamics

在压水反应堆中,自然循环能够在失去厂外电源、主泵失效等事故工况下有效导出堆芯的衰变热,对提高反应堆的安全性有重要意义。

自然循环系指在闭合回路中靠流体的密度差异而形成的浮升力驱动流体循环流动的一种能量传输方式,其特点是低流量、大温差。在自然循

收稿日期:2007-05-08;修回日期:2007-07-27

作者简介:张 勇(1980—),男,湖南龙山人,助理工程师,硕士,反应堆热工水力与安全分析专业

环工况下,加热部件和冷却部件的流动与传热特性会出现一些新的特征。

在中国核动力研究设计院的试验台架上进行的自然循环能力试验时确实发现:在自然循环低流量工况下,蒸汽发生器一次侧部分的阻力系数较强迫循环工况下大了数倍,而一次侧其他部分的阻力系数变化不大。对于压水堆,自然循环工况下蒸汽发生器一次侧阻力约占一回路总阻力的 1/3,其中,大部分是 U 型管的阻力。因此,U 型管部分的阻力对自然循环能力具有较大影响。

本工作将对倒 U 型管式蒸汽发生器一次侧在自然循环低流量条件下的单相流动特性进行分析研究。

1 倒 U 型管内流动特性

图 1 所示为倒 U 型管式蒸汽发生器一次侧示意图。假定 U 型管高度 $H(\text{m})$ 为其长度 $L(\text{m})$ 的一半,即 $H=L/2$ 。

1.1 单管内单相压降特性

U 型管的长度 L 与内直径 $D(\text{m})$ 之比很大,就蒸汽发生器而言,其比值在几百至 1 000 左右,因此,可以假定 U 型管是一维的。其动量方程如下:

$$\left\{ \begin{array}{l} \left(\frac{4}{\pi D^2} \right)^2 | \dot{m} | \dot{m} \frac{\partial}{\partial l} \left(\frac{1}{\rho} \right) = \\ - \frac{\partial}{\partial l} p - \frac{f}{2D} \left(\frac{4}{\pi D^2} \right)^2 | \dot{m} | \dot{m} \left(\frac{1}{\rho} \right) - \rho g \\ \quad (0 \leq l \leq H) \\ \left(\frac{4}{\pi D^2} \right)^2 | \dot{m} | \dot{m} \frac{\partial}{\partial l} \left(\frac{1}{\rho} \right) = \\ - \frac{\partial}{\partial l} p - \frac{f}{2D} \left(\frac{4}{\pi D^2} \right)^2 | \dot{m} | \dot{m} \left(\frac{1}{\rho} \right) + \rho g \\ \quad (H < l \leq 2H) \end{array} \right. \quad (1)$$

其中: \dot{m} 为管内质量流量, kg/s ; l 为倒 U 型管轴向长度, m ; ρ 为流体密度, kg/m^3 ; p 为驱动压头, Pa ; g 为重力加速度, m/s^2 。

假定二次侧温度恒定为 $T_2(\text{K})$ 、U 型管壁导热系数恒定为 $\lambda_w(\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K}))$,若忽略 U 型管内外壁面与流体温度的差异以及 U 型管内流体的轴向传热,则 U 型管内流体温度 T 沿轴向 l (起点为 U 型管入口)的分布^[1-2]如下:

$$T(l) = T_2 + (T_{in} - T_2) e^{-l/\Lambda} \quad (2)$$

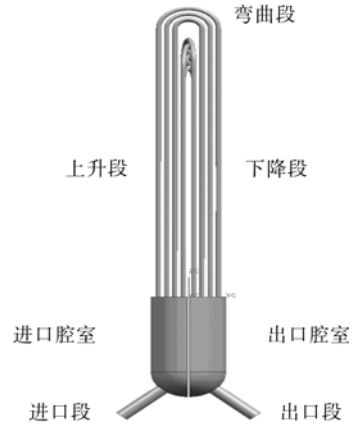


图 1 倒 U 型管式蒸汽发生器一次侧示意图
Fig. 1 Sketch map of primary side of UTSG

其中: T_{in} 为一次侧进口温度, K ; $\Lambda = c_p \dot{m} \ln(D_{out}/D)/2\pi\lambda_w$, c_p 为比定压热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; D_{out} 为倒 U 型管外直径, m 。则壁面等效传热系数 $hc = 2\lambda_w/D \ln(D_{out}/D)$ 。

若

$$\rho(T) = \rho_0 (1 - \beta(T - T_0)) \quad (3)$$

则沿 U 型管轴向 l 的流体密度分布为:

$$\rho(l) = \rho_n (1 - \beta(T_2 - T_{in})(1 - e^{-l/\Lambda})) \quad (4)$$

将式(4)代入式(1),求解微分方程组得到倒 U 型管内压降^[1-2]为:

$$\Delta p = - \frac{1}{\rho_n D^5 \pi^2} \left(8 | \dot{m} | \dot{m} \cdot \left(\frac{f \Lambda \ln(1 + \beta(-1 + e^{-2H/\Lambda})(T_2 - T_{in}))}{-1 + \beta T_2 - \beta T_{in}} + 2 \left(D + \frac{fH}{-1 + \beta T_2 - \beta T_{in}} - \frac{D}{1 + \beta(-1 + e^{-2H/\Lambda})(T_2 - T_{in})} \right) \right) \right) - g\beta\Lambda(1 - e^{-H/\Lambda})^2 (T_{in} - T_2) \rho_n \quad (5)$$

其中: β 为热膨胀系数, K^{-1} ; Δp 为压降, Pa ; f 为摩擦系数。

$$\Delta p_L = - g\beta\Lambda (1 - e^{-H/\Lambda})^2 (T_{in} - T_2) \rho_n \quad (6)$$

其中: Δp_L 为提升压降, Pa ,恒为负值。若正向流能被充分冷却,则对发生“倒流”的管子,有 $T_2 - T_{in} \approx 0$,因此,式(5)可简化为:

$$\Delta p = \frac{16fH | \dot{m} | \dot{m}}{\rho_{T_2} D^5 \pi^2} \quad (7)$$

若假定流体比定压热容为恒定值,根据能量守恒,温度、流量大致有如下关系:

$$F_{out}(T_1 - T_0) = F_{in}(T_{in} - T_0) \quad (8)$$

其中： F_{a+} 为总的正向流量； T_i 为进口腔室内平均温度； T_o 为出口腔室内平均温度； F_{in} 为进口总流量。

1.2 多管内流动特性

对于多根 U 型管的情况，根据式 (5) 和 (7)，在特定的参数条件(表 1)下可得到如图 2 所示的流量压降关系曲线。

从图 2a 可看出，长管可为负流量，与此同时，短管为正流量。在流量为负值时，长、短管压降均为负值；在流量为 0 时，长、短管压降为 0；在流量为正值时，长、短管压降随流量增大，首先减小为负值，至极小值(短管为 C 点、对应压降为 Δp_1 ，长管为 G 点、对应压降为 Δp_2)后增大，然后变为正值，继续增大。在压降小于 Δp_1 时，长、短管内流量均为负值；随压降增大，长、短管内流量的绝对值减小。当压降为 Δp_1 时，与此压降对应的短管流量有 2 个：1 个为正(C 点)，另 1 个为负(A 点)；而长管流量仅有 1 个(B 点)，为负值。当压降处于 $[\Delta p_1, \Delta p_2]$ 区间时，长管内为负流量，短管内为正流量。

同样，从图 2b 可看出，短管可以为负流量，与此同时，长管为正流量。在负流量区域，图 2a 与图 2b 的趋势是一致的；在正流量区域，相

同流量下，首先是长管的压降小于短管的，在流量大于一定值之后长管的压降才大于短管的压降。

管内发生倒流的必要条件如下。

1) 低流量。只有在低流量时，管内的提升压降才可能与摩擦压降相比拟，管内压降才可能为负值。在压降为负值时，才有可能出现倒流。

2) U 型管一、二次侧存在较大的温差。在 U 型管内流量较小的情况下，U 型管进出口将存在较大的温度(密度)差，导致提升压降的绝对值增大。

3) U 型管的高度差异也是影响能否发生倒流的重要因素。

2 双管流动特性的计算流体动力学分析

针对特定尺寸的两管并联结构(图 3)，采用计算流体动力学(CFD)方法对低流量条件下倒 U 型管内的流动特性进行了分析。分析采用的程序为 CFX5。

2.1 分析条件

分析采用的主要条件如下：工质为水；系统压力为 12 MPa；入口温度为 563.15 K；壁面热导率为 10 W/(m·°C)。

表 1 图 2 的绘制条件

Table 1 Plotting condition of Fig. 2

图号	D/m	D _{out} /m	$c_p/$ (J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	$\lambda_w/$ (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	$\rho_m/$ (kg·m ⁻³)	T_2/K	T_{in}/K	β/K^{-1}	f	长管 高度/m	短管 高度/m
a	0.012 3	0.015	4 000	10	740	478.15	563.15	0.002 04	0.01	4	2
b	0.012 3	0.015	4 000	10	740	478.15	563.15	0.002 04	0.001	3	2

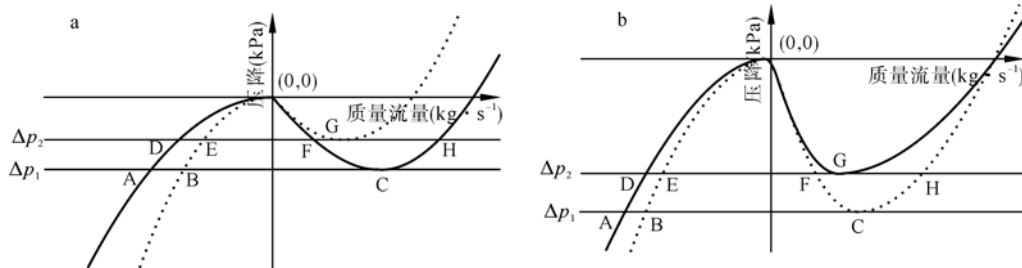


图 2 长管和短管压降随质量流量变化曲线

Fig. 2 Pressure drop vs. mass flow rate of long and short tubes

实线——短管；虚线——长管

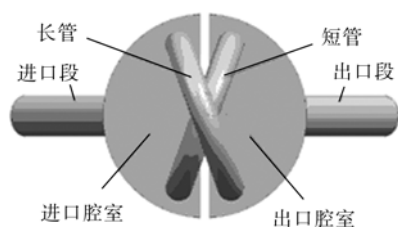


图 3 双管并联结构图
Fig. 3 Structure of double tube

倒 U 型管结构尺寸如下:管内直径,12.3 mm;管外直径,15 mm;U 型管弯曲段半径,35.11 mm;下腔室半径,47 mm。

边界条件:入口给定流量及温度,出口取相对压力为 0,二次侧恒温,不进行流固耦合分析,换热边界取壁面等效传热系数 h_c ,采用 SST 湍流模型^[3-5]。

本工作仅对表 2 所列工况进行分析。

2.2 结果与分析

在工况 A、B 下双管流量分配随进口总流量变化的曲线示于图 4,在工况 C 下双管流量分配随二次侧温度变化的曲线示于图 5,图 6 所示为工况 A 下进口总流量为 0.03 kg/s 时管入口附近的温度分布。归一化流量定义为:管

内流量与单管平均流量之比,流动为正向时其值为正,反之为负。

由图 4a 可明显看出,在进口流量很低时,长管内发生了倒流,随流量增大长管内倒流减小;在进口流量为 0.032 5 kg/s 时,长管流量突然转变为正向流;在进口流量为 0.038 kg/s 时,短管内发生了倒流;在进口流量大于 0.058 kg/s 时,两管内流量均转变为正值。

从图 4b 可明显看出,其变化趋势与图 4a 类似,其不同之处是短管没有发生倒流,且在两管流量均为正值后,其长管流量明显小于短管流量。这是因为图 4b 的长短两管的高度差比图 4a 大得多。

由图 5 可看出,低流量时,在二次侧温度较低,一、二次侧温差较大时长管内出现了倒流,随二次侧温度升高,倒流逐渐减小,最终倒流消失。

图 6 左侧为进口腔室,右侧为出口腔室。可看出,进口腔室平均温度约为 543.3 K,低于进口温度 563.15 K,出口腔室平均温度约为 484.6 K。由式(8)可大致估算出倒流量约为 0.7 倍单管平均流量,此时,CFD 分析的倒流量值约为 0.8 倍单管平均流量(图 4a)。

表 2 分析工况

Table 2 Analysis condition

工况	长管直管段长度/mm	短管直管段长度/mm	进口段进口温度/K	进口总流量/(kg · s ⁻¹)	二次侧温度/K
A	3 000	2 000	563.15	0.016~0.20	478.15
B	6 000	1 000	563.15	0.016~0.20	478.15
C	3 000	2 000	563.15	0.022	478.15~563.15

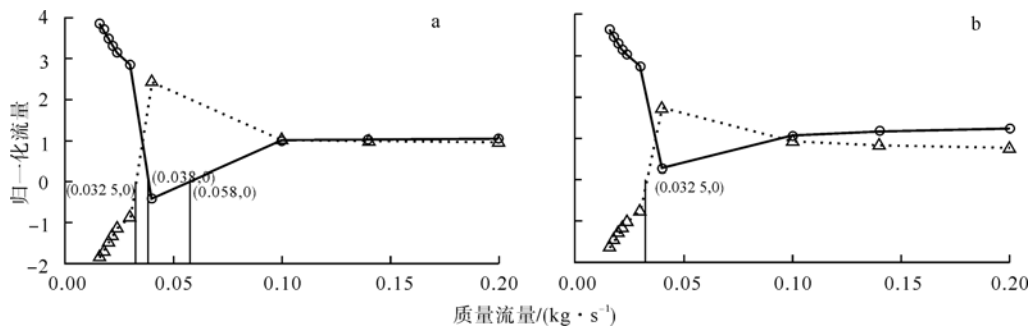


图 4 不同工况下不同进口总流量下双管流量分配

Fig. 4 Flow distribute vs. total inlet flow rate under different conditions

a——工况 A; b——工况 B
○——短管; △——长管

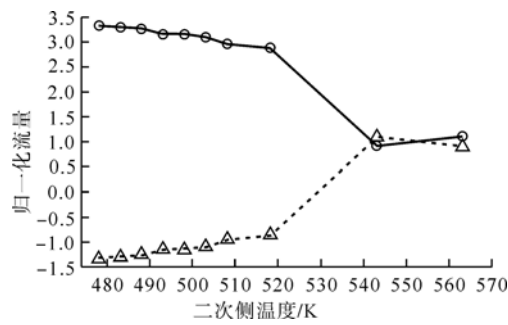


图5 工况 C 下不同二次侧温度时的双管流量分配

Fig. 5 Flow distribute vs. temperature of second side under condition C

○——短管;△——长管

3 结论

通过研究倒 U 型管式蒸汽发生器一次侧内的流动特性,可得出如下结论。

1) 进口总流量低是导致 U 型管内发生倒流的主要因素。在进口总流量低时,长管和短管都有可能发生倒流;随进口总流量增加,倒流量减小;当总流量进一步增加时,倒流管内的流量将转变为正向流;随后管内流量分配趋向恒定。

2) 一、二次侧存在温差也是影响倒流的重要条件。在一次侧进口温度恒定的条件下,随二次侧温度增加,倒流量将减小,并最终转变为正向流。

3) 管内发生倒流时表现的宏观特征有:进口腔室平均温度低于进口温度;总压降为负。

参考文献:

[1] JEONG J J, HWANG M, LEE Y J. Single-phase flow excursion in the primary side of a ver-

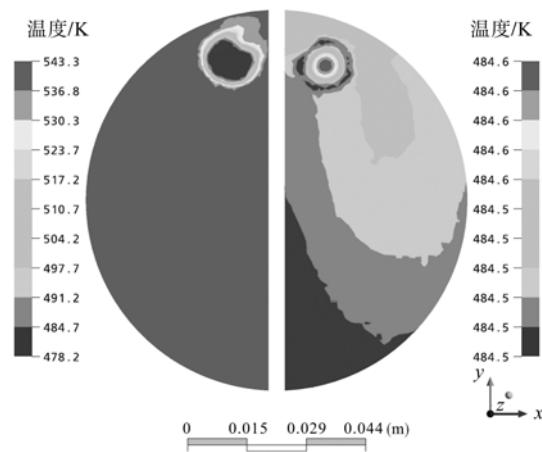


图6 工况 A 下入口流量为 0.03 kg/s 时管入口附近温度分布

Fig. 6 Temperature distribution close to inlet of tube under condition A with total inlet flow rate 0.03 kg/s

tical, inverted U-tube steam generator[J]. Heat Mass Transfer, 2003, 30(5): 643-652.

- [2] 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.
- [3] WILCOX D C. Turbulence modeling for CFD [M]. Glendale, California, USA: Griffin Printing, 1994.
- [4] FERZIGER J H, PERIC M. Computational methods for fluid dynamics[M]. 3rd ed. Germany: Springer, 2002.
- [5] 王福军. 计算流体动力学分析——CFD 软件原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社,2004.