

基于单相可压缩模型的蒸汽发生器倒U型管内单相管间脉动特性研究

李振中, 马在勇, 张 舵, 步珊珊, 孙 皖, 张卢腾, 朱隆祥

Research on Single-phase Inter-tube Pulsation Characteristics in Inverted U-tube of Steam Generator Based on Single-phase Compressible Model

Li Zhenzhong, Ma Zaiyong, Zhang Duo, Bu Shanshan, Sun Wan, Zhang Luteng, and Zhu Longxiang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13832/j.jnpe.2022.05.0056>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

倒U型管蒸汽发生器单相管间脉动临界流速与倒流临界流速的对比分析

Comparative Analysis of Critical Velocities of Inter-tube Oscillation and Reverse Flow in Inverted U-tube Steam Generator under Single-phase Conditions

核动力工程. 2021, 42(5): 36-41

自然循环条件下蒸汽发生器倒U型管流量分配特性研究

Research on Flow Distribution Characteristics of Inverted U-Shaped Tube of Steam Generator under Natural Circulation Condition

核动力工程. 2021, 42(1): 192-197

基于CFD的蒸汽发生器U型管内回流现象数值分析

Simulation of Reflux in U-Tube of Steam Generator Based on CFD Method

核动力工程. 2019, 40(2): 10-15

自然循环U型管蒸汽发生器管内倒流受管长影响的理论研究

Theory Study on Effect of U-Tube Length on Reverse Flow in UTSG

核动力工程. 2021, 42(1): 23-27

基于U型管式蒸汽发生器倒流理论模型的倒流临界简化判定准则

Simplification of Critical Criteria for Reverse Flow Determination Based on Reverse Flow Theory Model of U-Tube Steam Generator

核动力工程. 2021, 42(6): 77-81

海洋条件下U型管蒸汽发生器传热管倒流特性研究

Investigation on Reversed Flow Characteristics of U-Tube Steam Generator under Ocean Conditions

核动力工程. 2021, 42(3): 37-42



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 0258-0926(2022)05-0056-07; DOI:10.13832/j.jnpe.2022.05.0056

基于单相可压缩模型的蒸汽发生器倒 U 型管内单相管间脉动特性研究

李振中, 马在勇*, 张 舵, 步珊珊, 孙 皖, 张卢腾, 朱隆祥

重庆大学低品位能源利用及系统教育部重点实验室, 重庆, 400044

摘要: 单相工况下的管间脉动现象可使蒸汽发生器倒 U 型管内倒流现象提前发生, 从而威胁其安全性。为探索单相管间脉动特性, 基于单相可压缩模型, 数值研究了管道长度、一次侧入口温度和压力、二次侧温度和换热系数对单相管间脉动临界流速的影响。结果表明, 当管道长度较短时, 管道长度的增加会使临界流速显著增加, 且倒 U 型管越长, 临界流速越大。一次侧入口温度和压力的增加均会使临界流速增加, 使单相管间脉动更易发生。二次侧换热系数的升高会使单相管间脉动对应的临界流速降低。然而二次侧温度对临界流速的影响呈现非单值性, 随着二次侧温度的升高, 临界流速先升高后降低。

关键词: 倒 U 型管; 单相管间脉动; 临界流速; 数值分析

中图分类号: TL334 **文献标志码:** A

Research on Single-phase Inter-tube Pulsation Characteristics in Inverted U-tube of Steam Generator Based on Single-phase Compressible Model

Li Zhenzhong, Ma Zaiyong*, Zhang Duo, Bu Shanshan,
Sun Wan, Zhang Luteng, Zhu Longxiang

Key Laboratory of Low-grade Energy Utilization Technologies and Systems, Ministry of Education,
Chongqing University, Chongqing, 400044, China

Abstract: The inter-tube pulsation under single phase condition can make the backflow of inverted U-tube steam generator occur in advance, thus threatening its safety. In order to explore the inter-tube pulsation characteristics under single phase, based on the single-phase compressible model, the effects of tube length, primary side inlet temperature and pressure, secondary side temperature and heat transfer coefficient on the single-phase inter-tube pulsating critical velocity are studied numerically. The results show that when the tube length is short, the critical velocity increases significantly with the increase of tube length, and the longer the inverted U-tube is, the greater the critical velocity is. The increase of temperature and pressure at the inlet of the primary side will increase the critical velocity, making the single-phase inter-tube pulsation more likely to occur. The increase of the heat transfer coefficient on the secondary side will decrease the critical velocity corresponding to the single-phase inter-tube pulsation. However, the influence of the secondary side temperature on the critical velocity is non-single-valued. With the increase of the secondary side temperature, the critical velocity first increases and then decreases.

Key words: Inverted U-tube, Single-phase inter-tube pulsation, Critical velocity, Numerical analysis

收稿日期: 2021-10-25; 修回日期: 2022-01-07

基金项目: 国家自然科学基金项目 (11905021, 51806023)

作者简介: 李振中 (1989—), 男, 副教授, 现从事两相流动换热及流动不稳定性研究工作, E-mail: cqulzz@cqu.edu.cn

*通讯作者: 马在勇, E-mail: mazy@cqu.edu.cn

0 引言

目前压水堆中普遍使用倒 U 型管蒸汽发生器 (UTSG)^[1] 作为核反应堆的主要热阱之一, UTSG 是一、二回路间的枢纽设备, 同时也是反应堆屏蔽系统中的第二道防护屏障, 其安全稳定运行对于核动力系统的的核心性极为重要^[2-3]。在特定工况下, UTSG 内可能发生流动不稳定现象, 造成流动阻力增大、传热系数下降以及流量、温度、压力等参数的波动, 甚至可能引发机械振动和沸腾危机, 威胁整个系统的安全性^[4]。因此, 针对 UTSG 流动不稳定性的研究一直是其设计和安全分析的重要内容。

由于 UTSG 几何结构的对称性, 低流速工况下重力压降起到重要作用, 因此, 除了已被广泛研究的两相流动不稳定性外^[5-10], 还需对 UTSG 单相流动不稳定性开展研究。当前针对 UTSG 单相流动不稳定性的研究主要集中在流量漂移型的倒流现象^[11-14]。然而 UTSG 内也可能发生管间脉动型单相流动不稳定性。Hao 等^[15] 发现管间脉动诱发的出口温度波动发生于倒流之前, 这与张锐等^[16-17] 的研究结论相符, 即管间脉动现象可能造成倒流早发。由于实验条件的限制, 张锐等^[16] 的研究中仅在相对狭窄的工况范围内获得了一次侧入口温度、二次侧流量及回路阻力系数对单相管间脉动的影响, 而未能开展广泛的参数影响研究, 也未能充分揭示单相管间脉动的机理。随着计算机技术的发展, 数值模拟成为进行核动力系统热工水力分析的有力工具^[18-20]。近来, Ma 等^[21] 通过数值模拟探索了 UTSG 单相管间脉动的机理, 发现在理论分析中无法获得单相管间脉动的原因是引入了不可压缩假设, 并将管间脉动现象归类为密度波型不稳定性。

综上所述, 当前对 UTSG 单相管间脉动的研究尚不够深入, 难以对不同工况下的 UTSG 单相流动不稳定性进行评估, 为此, 需要开展广泛的参数影响研究。基于可压缩单相流体模型, 研究了管道长度、一次侧入口温度和压力、二次侧温度和换热系数等参数对 UTSG 倒 U 型管内单相管间脉动临界流速的影响规律, 以增进对倒 U 型管单相管间脉动现象的认识, 为 UTSG 单相流动不稳定性分析和相关设计提供指导。

1 数学物理模型

1.1 物理模型

计算模型由 2 根并联的倒 U 型管组成 (图 1)。倒 U 型管内部为一次侧, 管外为二次侧。管内高温流体依次流过入口联箱、竖直上升段、弯管和垂直下降段, 到达出口联箱, 并通过管壁将热量传递给二次侧。倒 U 型管的内径和外径分别为 0.015 m 和 0.02 m。一次侧流体的热力学性质和一次、二次侧间的换热情况对单相管间脉动均会造成影响, 因此研究管道长度 (L)、一次侧入口温度 ($T_{1,in}$)、一次侧入口压力 ($p_{1,in}$)、二次侧温度 (T_2) 和二次侧换热系数 (h_2) 对单相管间脉动临界流速的影响。

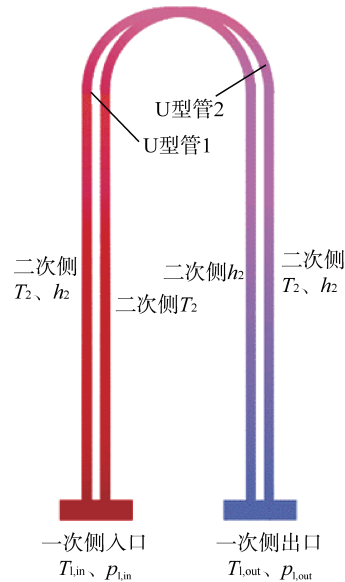


图 1 倒 U 型管单相管间脉动计算模型

Fig. 1 Calculation Model of Single-Phase Inter-Tube Pulsation of Inverted U-tube

$T_{1,out}$ —一次侧出口温度; $p_{1,out}$ —一次侧出口压力

模拟的基础工况为: L 为 6 m; 一次侧入口压力为 1.0 MPa; T_2 为 313 K; h_2 为 1500 W/(m² · K)。

1.2 控制方程及边界条件

将一次侧流体视为单相可压缩流体, 在一维假设下, 管内流动的质量、动量和能量守恒方程组分别为:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u u)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial z} - \left[\frac{f}{D_c} + \sum_{i=1}^n k_i \delta(z-z_i) \right] \frac{\rho u^2}{2} - \rho g \sin \theta \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho h}{\partial t} + \frac{\partial \rho u h}{\partial z} = \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{4q}{D_c} \quad (3)$$

式中, ρ 为流体密度, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$; u 为流体速度, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; t 为时间, s ; z 为流动方向坐标, m ; p 为压力, Pa ; D_c 为当量直径, m ; g 为重力加速度, $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$; θ 为夹角, $^\circ$; h 为流体焓, J ; q 为热流密度, $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$; f 为摩擦系数; k_i 为节流系数; δ 为 Dirac 函数。

f 可根据流动状态采用基于圆管内充分发展层流解析解的摩擦系数公式^[22]或 Blasius 公式计算。水的密度 ρ 可根据水的 h 和 p 来确定, 如式 (4) 所示, 该式与守恒方程组构成了描述一次侧流动换热过程的封闭方程组。

$$\rho = \rho(p, h) \quad (4)$$

对式 (4) 两边分别对 t 求导可得:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \frac{\partial \rho}{\partial h} \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial \rho}{\partial p} \frac{\partial p}{\partial t} \quad (5)$$

将式 (5) 代入式 (1) 和式 (3) 可得:

$$\frac{\partial \rho}{\partial h} \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial \rho}{\partial p} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial z} = 0 \quad (6)$$

$$\left(h \frac{\partial \rho}{\partial h} + \rho \right) \frac{\partial h}{\partial t} + \left(h \frac{\partial \rho}{\partial p} - 1 \right) \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial \rho u h}{\partial z} = \frac{4q}{D_c} \quad (7)$$

通过求解由式 (2)、式 (6)、式 (7) 组成的方程组, 就能得到一次侧的速度、压力和焓沿流动方向的分布。

边界条件是流动换热问题数学描述的另一重要组成部分。入口处给定总的质量流量, 同时给定相应的入口压力和进口焓。出口处各变量采用零梯度边界。在壁面热边界条件方面, 由于管壁非常薄, 通过给定的二次侧温度和二次侧换热系数计算沿流动方向上的壁面温度 T_w 和热流密度 q , 其中倒 U 型管内壁面的对流换热系数通过 Dittus-Boelter 公式计算。

1.3 数值方法及验证

采用交错网格将计算域沿流动方向划分为一系列控制体, 其中 p 、 h 、 ρ 等参数存储在主控制体中, 而 u 存储在主控制体的上下游界面。基于交错网格, 将控制方程中的非稳态项、对流项和压力梯度项分别采用欧拉格式、迎风格式

和中心差分格式进行离散, 获得代数方程组, 带入离散化的边界条件并进行求解, 即可得到不同时刻的流场、压力场和焓场。基于单相工况下的流量漂移 (FE) 不稳定性对数值方法进行验证。如图 2 所示, 数值计算所得的 FE 临界流速与 Sanders^[11] 关联式的预测值吻合良好, 两者之间的最大相对误差小于 10%。这说明所采用的数值方法可以描述倒 U 型管内的流动换热。

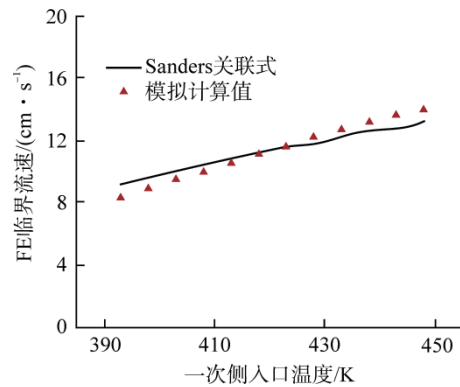


图 2 不同入口温度下 FE 临界流速

Fig. 2 Critical Velocity of FE under Different Inlet Temperature

2 结果与讨论

为研究不同因素对倒 U 型管单相管间脉动临界流速的影响, 在系统达到稳态后, 施加 -0.0015 kg/s 的流量扰动, 通过观察流动参数随时间的变化来判断系统状态。图 3 为施加流量扰动触发单相管间脉动的典型过程。当质量流量较大时, 系统在受到流量扰动后, 管内流量发生衰减波动, 并重新达到稳态。然而当质量流量降低到一定程度后, 在扰动的作用下, 管内流量出现增幅振荡, 无法恢复到平衡状态, 此时产生了强烈的单相管间脉动。显然, 存在一个流量值使系统在流量扰动的作用下产生等幅振荡, 此时对应的入口流速即为临界流速。

2.1 管道长度对临界流速的影响

图 4 为多组入口过冷度工况下临界流速随着管道长度的变化。随着管长的增加, 临界流速首先增加较快, 然后缓慢增加。总体上, 管长越大, 临界流速越大, 系统越容易发生单相管间脉动。图 4 还表明, 一次侧入口温度越高, 管长的影响也越显著。当管长较小时, 入口处的流量扰动能

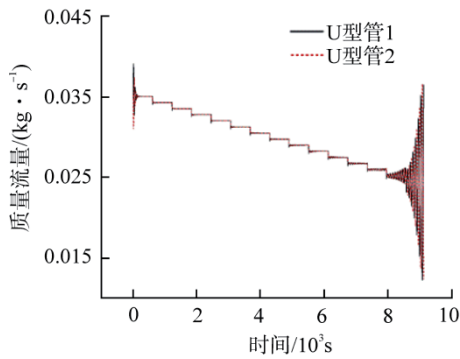


图3 单相管间脉动的典型过程

Fig. 3 Typical Process of Single-phase Inter-tube Pulsation

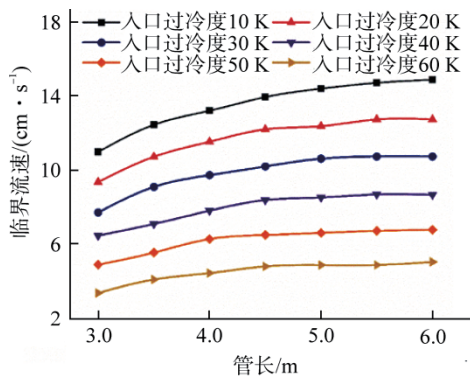


图4 管道长度对单相管间脉动临界流速的影响

Fig. 4 Effect of Tube Length on Single-phase Inter-tube Pulsation Critical Velocity

很快地影响整个流道，建立起压降反馈，并消除流体局部压缩或膨胀的影响，从而维持流量稳定，此时系统的临界流速较低。随着管长的增加，入口处流量扰动传播到整个流道的时间变长，导致压降反馈出现延迟，因此系统的稳定性下降，临界流速快速增加。当管长增加到一定程度后，此时重力压降和沿程摩擦压降的影响逐渐占据主导，系统的阻尼比增加，因此随着管长的进一步增加，临界流速的变化不大。从图4还可看到，在管长为6 m，入口过冷度为20 K时，临界速度约为12 cm/s，与张锐等^[16]的实验结果吻合良好。

2.2 一次侧入口温度对临界流速的影响

不同入口压力下一次侧入口温度对临界流速的影响如图5所示。入口压力一定时，随着一次侧入口温度的增加，临界流速逐渐增加，系统稳定性下降，单相管间脉动更容易发生。这与张锐等^[16]从实验结果所得的结论是一致的。因为一次侧入口温度越高，管内流体的体积膨胀系数越大，同时一二次侧间的换热越强，因焓值变化导致的

一次侧流体密度变化越大，这都会降低系统的稳定性并使临界流速增加。从图5中还可以看到，随着一次侧入口温度的增加，单相管间脉动的临界流速不是线性地增加，具有一定的波动。这是因为在数值计算中，单相管间脉动的获取是通过阶梯型改变流量实现的，因此流动不稳定点的计算值相对准确值存在一定偏差。图6是其他条件一致时，2种入口过冷度下的单相管间脉动振幅曲线。当过冷度减小时，管间脉动振幅增大，且呈发散趋势，系统稳定性减弱。

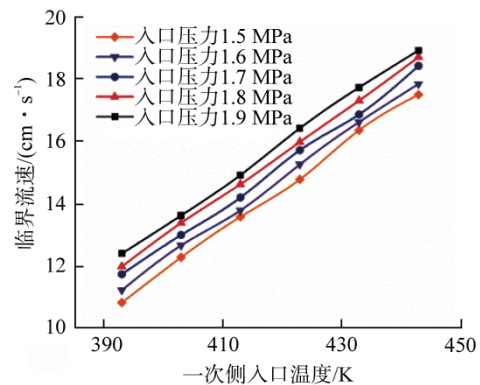


图5 一次侧入口温度对临界流速的影响

Fig. 5 Effect of Primary Side Inlet Temperature on Critical Velocity

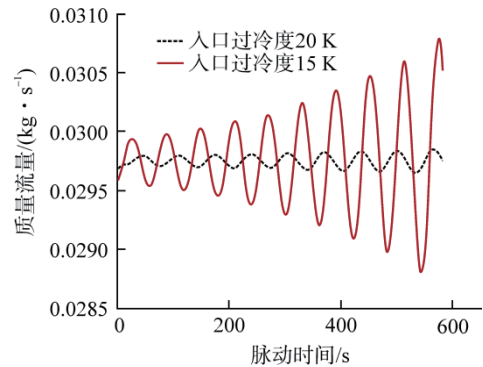


图6 一次侧入口过冷度对脉动振幅的影响

Fig. 6 Effect of Primary Side Inlet Subcooling on Pulsation Amplitude

2.3 一次侧入口压力对临界流速的影响

图7为不同入口过冷度下一次侧入口压力对倒U型管单相管间脉动临界流速的影响，其中压力在1.5~2.5 MPa之间。当入口过冷度一定时，随着入口压力的增加，临界流速也逐渐增加，说明入口压力的提高会降低系统稳定性。在两相流工况下，系统压力增加有助于提高系统的稳定

性^[23]；而在单相流的情况下，入口压力的影响正好相反。这是因为在管内两相流工况中，管内流体往往处于被加热状态。系统压力增加，极限出口含汽率增加，同时汽液两相间的密度差也减小，因此提高系统压力有助于系统的稳定性。然而，在单相流工况中，随着压力的升高，水的温度会升高，密度变小，可压缩性增大，因流量变化导致的扰动变强，进而使系统稳定性降低。图8为一次侧入口压力对单相管间脉动振幅的影响。入口压力为2.0 MPa时，单相管间脉动的振幅明显大于1.5 MPa压力下的振幅，系统稳定性减弱，这与前述关于临界流速的分析结果相符。

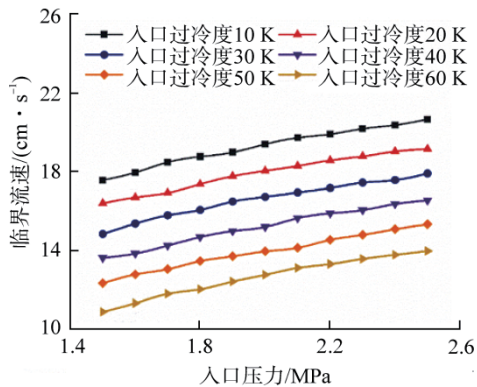


图7 一次侧入口压力对临界流速的影响

Fig. 7 Effect of Primary Side Inlet Pressure on Critical Velocity

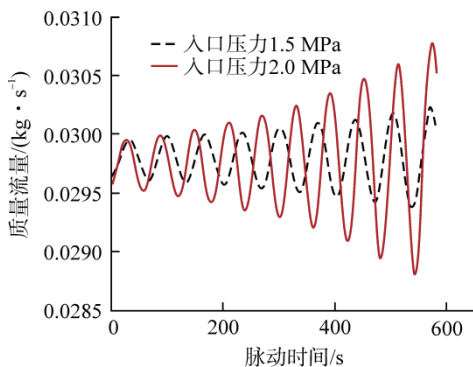


图8 一次侧入口压力对单相管间脉动振幅的影响

Fig. 8 Effect of Primary Side Inlet Pressure on Single-Phase Inter-Tube Pulsation Amplitude

2.4 二次侧温度对临界流速的影响

二次侧温度对单相管间脉动临界速度的影响，如图9所示。在不同一次侧入口过冷度下，随着二次侧温度的升高，临界流速均先上升后降低。这说明随着二次侧温度的升高，系统的稳定性先

减弱，后增强。由于倒U型管中的一次侧流体是处于被冷却的状态，因此随着二次侧温度的提高，二次侧温度更接近工质温度，由温度变化引起的工质密度变化更小，这将有助于减小管内各部分流体间的密度差，从这方面考虑，二次侧温度的提高有利于系统稳定。另一方面，二次侧的温度越高，一二次侧间的换热能力会下降，沿着倒U型管内流动方向，一次侧流体的温度和密度会在更大的长度范围内变化，增大了整个倒U型管内密度分布的整体不均匀性，这会降低系统的稳定性，使单相管间脉动的临界流速增大。上述2个因素的综合效果使二次侧温度对倒U型管单相管间脉动的影响表现出非单值性。在二次侧温度较低时，后一种影响占主导地位，此时单相管间脉动临界流速随二次侧温度的提高而增加；二次侧温度进一步增加，前一种作用的影响增强，系统稳定性随着二次侧温度进一步增加而增强，临界流速逐渐减小。

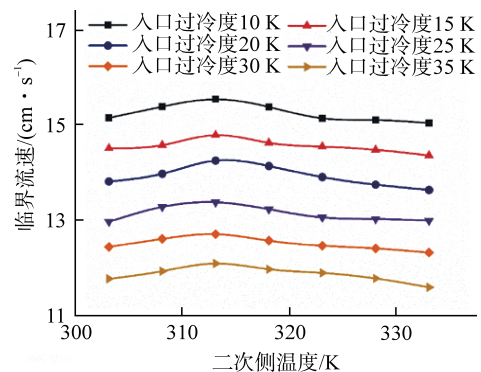


图9 二次侧温度对单相管间脉动临界流速的影响

Fig. 9 Effect of Secondary Side Temperature on Single-Phase Inter-Tube Pulsation Critical Velocity

2.5 二次侧换热系数对临界流速的影响

图10给出了不同入口过冷度工况下二次侧换热系数对单相管间脉动临界流速的影响。本文所研究的二次侧换热系数为1500~2100 W/(m²·K)，处于水的单相强制对流换热系数区间。随着二次侧换热系数的升高，系统发生单相管间脉动时对应的临界流速降低，管间脉动更不易发生。这是因为随着二次侧换热系数的提高，一次侧流体在进入倒U型管后冷却更充分，在大部分下游区域，流体温度和密度的变化更小，使得沿着流动方向

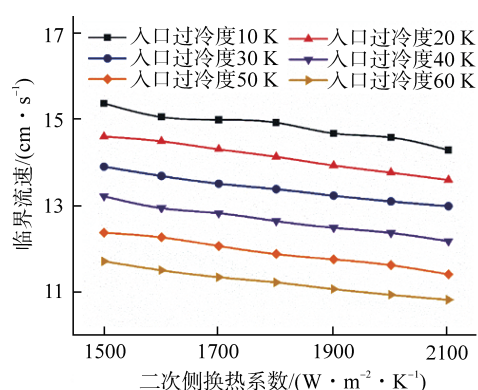


图 10 二次侧换热系数对临界流速的影响

Fig. 10 Effect of Secondary Side Heat Transfer Coefficient on Critical Velocity

上流体密度的总体分布更均匀，从而增加了系统的总体稳定性。这与 2.4 节中“二次侧温度的增加使换热能力降低，从而降低系统稳定性”的机制类似。

3 结论

基于单相可压缩模型，对蒸汽发生器倒 U 型管单相管间脉动临界流速进行了数值研究，获得了管长、一次侧入口温度、压力、二次侧温度、换热系数对单相管间脉动临界流速的影响。研究发现：

(1) 随着管长的增加，临界流速首先快速增加，然后缓慢增加。总体上，管道越长，系统越易发生单相管间脉动。

(2) 一次侧入口温度和压力的增加会提高一次侧流体的可压缩性，从而使临界流速增加，促进单相管间脉动的发生。

(3) 二次侧温度对临界流速的影响呈现非单值性，随着二次侧温度的升高，临界流速先上升后降低。

(4) 二次侧换热系数的升高使一次侧流体在进入倒 U 型管后冷却更充分，提高流动方向上流体密度分布的总体均匀性，从而降低临界流速。

参考文献：

[1] 孙中宁. 核动力设备[M]. 第二版. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2017: 25-40.
[2] ZHAO X H, WANG M J, CHEN C, et al. Three-

dimensional study on the hydraulic characteristics under the steam generator (SG) tube plugging operations for AP1000[J]. *Progress in Nuclear Energy*, 2019, 112: 63-74.

- [3] ZHAO X H, LIAO Y X, WANG M J, et al. Numerical simulation of micro-crack leakage on steam generator heat transfer tube[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2021, 382: 111385.
[4] 于平安, 朱瑞安, 喻真焱, 等. 核反应堆热工分析[M]. 第三版. 上海: 上海交通大学出版社, 2002: 133-134.
[5] LEDINEGG M. Instability of flow during natural and forced circulation[J]. *Die Waerme*, 1938, 61(8): 891-898.
[6] LORENZINI E. A simplified method proposal for practical determination of aperiodic two-phase flow instability[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 1981, 7(6): 635-645.
[7] RUSPINI L C, MARCEL C P, CLAUSSE A. Two-phase flow instabilities: a review[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2014, 71: 521-548.
[8] HU L, CHEN D Q, HUANG Y P, et al. Numerical investigation of the mechanism of two-phase flow instability in parallel narrow channels[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2015, 287: 78-89.
[9] 黄彦平, 马介亮, 肖泽军, 等. 多管平行通道管间脉动影响因素试验研究[J]. *核动力工程*, 2004, 25(4): 314-318,336.
[10] 毕勤成, 刘伟民, 高峰, 等. U型管高压汽-液两相流动密度波型不稳定性的实验研究[J]. *核动力工程*, 2005, 26(6): 559-562.
[11] SANDERS J. Stability of single-phase natural circulation with inverted U-tube steam generators[J]. *Journal of Heat Transfer*, 1988, 110(3): 735-742.
[12] 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(3): 303-314.
[13] LI M R, CHEN W Z, HAO J L, et al. Investigation on reverse flow characteristics in UTSGs with coupled heat transfer between primary and secondary sides[J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2020, 137: 107064.
[14] 王少明, 郝建立, 章德, 等. 蒸汽发生器U型管单相流动不稳定性分析[J]. *原子能科学技术*, 2016, 50(5): 819-822.
[15] 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.
- [16] 张锐, 马在勇, 蒋志鹏, 等. 倒U型管蒸汽发生器单相管间脉动现象影响参数研究[J]. *原子能科学技术*, 2021, 55(8): 1403-1410.
- [17] 张锐, 马在勇, 蒋志鹏, 等. 倒U型管蒸汽发生器单相管间脉动临界流速与倒流临界流速的对比分析[J]. *核动力工程*, 2021, 42(5): 36-41.
- [18] 田文喜, 王明军, 秋穗正, 等. 基于CFD方法的核动力系统热工安全特性研究进展[J]. *原子能科学技术*, 2019, 53(10): 1968-1982.
- [19] WANG M J, WANG Y J, TIAN W X, et al. Recent progress of CFD applications in PWR thermal hydraulics study and future directions[J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2021, 150: 107836.
- [20] 李龙泽, 王明军, 田文喜, 等. CPR1000全厂断电叠加蒸汽发生器安全阀误开启事故引起的严重事故分析[J]. *原子能科学技术*, 2014, 48(6): 1020-1025.
- [21] MA Z Y, ZHANG L T, SUN W, et al. Single-phase density wave oscillation -A new mechanism of flow instability in inverted U-type steam generator[J]. *Progress in Nuclear Energy*, 2021, 138: 103836.
- [22] 景思睿, 张鸣远. 流体力学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2006: 175-177.
- [23] 吴鸽平, 秋穗正, 苏光辉, 等. 蒸汽发生器强迫循环流动不稳定性分析[J]. *核动力工程*, 2006, 27(4): 16-20,25.

(责任编辑: 张祚豪)