

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

张锐, 马在勇, 蒋志鹏, 张卢腾, 唐瑜, 岳倪娜, 孙皖, 潘良明, 周文雄

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

Zhang Rui, Ma Zaiyong, Jiang Zhipeng, Zhang Luteng, Tang Yu, Yue Nina, Sun Wan, Pan Liangming, and Zhou Wenxiong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13832/j.jnpe.2021.05.0036>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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

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

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

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

海洋条件下自然循环蒸汽发生器U型管内倒流特性研究

Research on Characteristics of U-tube Backflow in Natural Circulation Steam Generator under Ocean Conditions
核动力工程. 2021, 42(4): 6-13

自然循环条件下蒸汽发生器U型传热管倒流分布特性的实验研究

Experimental Study on Distribution Characteristics of Flow Reversal in U-Tubes of Steam Generator under Natural Circulation
核动力工程. 2018, 39(4): 43-47



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 0258-0926(2021)05-0036-06; doi:10.13832/j.jnpe.2021.05.0036

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

张 锐¹, 马在勇¹, 蒋志鹏¹, 张卢腾¹, 唐 瑜²,
岳倪娜², 孙 皖¹, 潘良明¹, 周文雄¹

1. 重庆大学低品位能源利用技术及系统教育部重点实验室, 重庆, 400044;
2. 中国核动力研究设计院中核核反应堆热工水力技术重点实验室, 成都, 610213

摘要: 为了提高核反应堆系统的安全性与经济性, 本文通过实验研究了单相工况下倒 U 型管管间脉动临界与倒流临界之间的关系。基于对实验数据的处理, 获得了不同工况下的管间脉动临界流速与倒流临界流速, 并对 2 种不稳定性的临界流速进行了比较。结果表明, 在本实验工况下, 管间脉动临界流速总是高于倒流临界流速, 其比值最高可达 1.46; 该比值随着一次侧入口温度的升高和回路阻力的减小而增大, 随着二次侧冷却水流量的增大而增大, 但增幅逐渐减小; 回路阻力对脉动具有显著的抑制作用, 在回路阻力较小时, 可能发生较为严重的管间脉动。

关键词: 倒 U 型管蒸汽发生器; 单相; 管间脉动; 临界流速

中图分类号: TL334 **文献标志码:** A

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

Zhang Rui¹, Ma Zaiyong¹, Jiang Zhipeng¹, Zhang Luteng¹, Tang Yu²,
Yue Nina², Sun Wan¹, Pan Liangming¹, Zhou Wenxiong¹

1. Key Laboratory of Low-Grade Energy Utilization Technologies and Systems, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing, 400044, China; 2. CNNC Key Laboratory on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics Technology, Nuclear Power Institute of China, Chengdu, 610213, China

Abstract: In order to improve the safety and cost-effectiveness of nuclear reactor system, the authors study experimentally the relationship between the inter-tube oscillation criticality and reverse criticality in inverted U-shaped tube under single phase condition. By processing the experimental data, the authors then obtain and compare the critical velocities of inter-tube oscillation and reverse flow under different conditions. The results show that under the experimental conditions, the critical velocity of inter-tube oscillation is always higher than that of reverse flow, and the ratio of the former to latter one reaches up to 1.46. It increases with the rise of the inlet temperature of the primary side and the fall of the loop resistance, as well as with the increase of the cooling water flow on the secondary side, but at a gradually decreasing rate. Also, the results indicate that the loop resistance can significantly limit the oscillation, and that a serious inter-tube oscillation may occur at a low loop resistance.

收稿日期: 2020-09-03; 修回日期: 2020-09-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (11905021, 11805026)

作者简介: 张 锐 (1996—), 男, 硕士研究生, 现主要从事于通道间传热与流动方面的研究, E-mail: 201910131058@cqu.edu.cn

Key words: Inverted U-tube steam generator, Single-phase, Inter-tube oscillation, Critical velocity

0 引言

蒸汽发生器是核动力装置中的重要设备^[1], 倒 U 型管蒸汽发生器 (USTG) 由于结构特殊, 其流动传热过程较为复杂, USTG 内流动不稳定性现象可在单相及两相工况下发生, 准确预测 USTG 的流动不稳定性可以提高反应堆的经济性以及安全性, 因而对 USTG 流动不稳定性的研究成为相关设计及安全分析的重要内容^[2-4]。

针对 USTG 流动不稳定性中最为重要的倒流特性以及脉动特性, 国内外许多学者已进行了大量研究。Kukita 等^[5] 在自然循环实验台架上进行了实验, 发现随着一次侧冷却剂质量流量的减少, 在长度不同的 U 型管内, 可能会同时出现单相或两相的倒流现象与回流冷凝现象; Sanders^[6] 通过一维 Oberbeck-Boussinesq 方程, 建立了倒 U 型管内的全水动力曲线, 并对倒流现象的机理进行了解释, 指明在压降-流量曲线拐点处发生了倒流现象, 第 1 次提出倒 U 型管出现倒流现象的本质是静态流动不稳定性; Hao 等^[7] 通过实验研究发现, 在自然循环条件下 U 型管进口温度升高或二次侧流量降低的过程中, 随着临界质量流量 (CMFR) 增加, 更容易出现倒流现象, 研究得出了倒流临界点和 USTG 一次侧入口质量流量呈线性关系的结论; Shen 等^[8] 应用小扰动理论, 采用数值计算方法分析了二次侧水位高度对 USTG 倒流临界的影响, 并与 Hao 等^[7] 的实验结果进行了对比验证, 结果表明, 当 USTG 二次侧水位下降时, 倒流临界流速增大, 倒流更容易发生; Guo^[9] 等对双通道两相流动不稳定性进行了研究, 通过实验发现增加入口阻力系数可以稳定双通道系统; 周云龙^[10] 建立了并联通道两相流动不稳定性数学模型, 计算发现系统的脉动与系统初始扰动无关, 多通道并联管的脉动特性与双通道并联管相同。

上述关于管间脉动型流动不稳定的研究均是针对两相工况, 而在单相工况下仅对倒流特性进行了分析, 还未有关于单相工况下管间脉动型流动不稳定的相关研究。因此, 本文拟通过开展单

相 USTG 流动不稳定性实验来研究单相管间脉动临界流速与倒流临界流速之间的关系, 以增进对 USTG 单相管间脉动现象的认识。

1 实验装置

1.1 实验回路系统

图 1 为实验系统示意图。本实验系统由 2 个回路组成, 一次侧实验回路中主要有水平预热器、竖直预热器 1、竖直预热器 2、冷凝器以及实验本体等; 二次侧实验回路中主要有二次侧屏蔽泵、流量计以及二次侧冷却系统等。实验工质为去离子水, 实验压力为 1.0 MPa, 使用氮气瓶进行稳压。

实验所用流量计为 F704-CAM-740007-1B2 型超声波流量计, 其精度为 $\pm 0.5\%$; 实验所用 NI 9205 数据采集卡的采集精度为 ± 3.23 mV, 在考虑流量计精度、采集板卡的采集精度以及流量的噪声后, 得到流量测量的最大不确定度为 8.44%。使用热电偶直接测量获得温度, 在考虑热电偶精度、采集板卡的采集精度以及噪声后得到温度测量的最大不确定度为 1.47%。

本文通过冷态实验测量回路两侧压降可得到回路总的阻力系数, 然后估算出回路沿程阻力系数以及其他阻力系数, 通过调节不同的电磁阀开度即可得到阀门开度与回路阻力系数之间的关系。

1.2 实验本体

按 GB 150—2011《压力容器》和 TSG 21—2016《固定式压力容器安全技术监察规程》设计和制造^[11-12] 实验本体, 如图 2 所示。实验本体主要包含进口腔室、出口腔室、U 型传热管组、冷却水入口腔室以及固定支架等零部件, 其中, U 型传热管组由 3 根传热管组成, 分别是长度为 7.024、7.644、8.244 m 的内管、中间管、外管。本实验在一次侧 U 型管处设置有入口温度测点及出口温度测点、入口压力测点及出口压力测点, 在二次侧下、中、上部均设置有温度测点, 用于监测 U 型管不同位置处的温度和压力, 通过进、出口压力可以得到 U 型管进、出口压降。

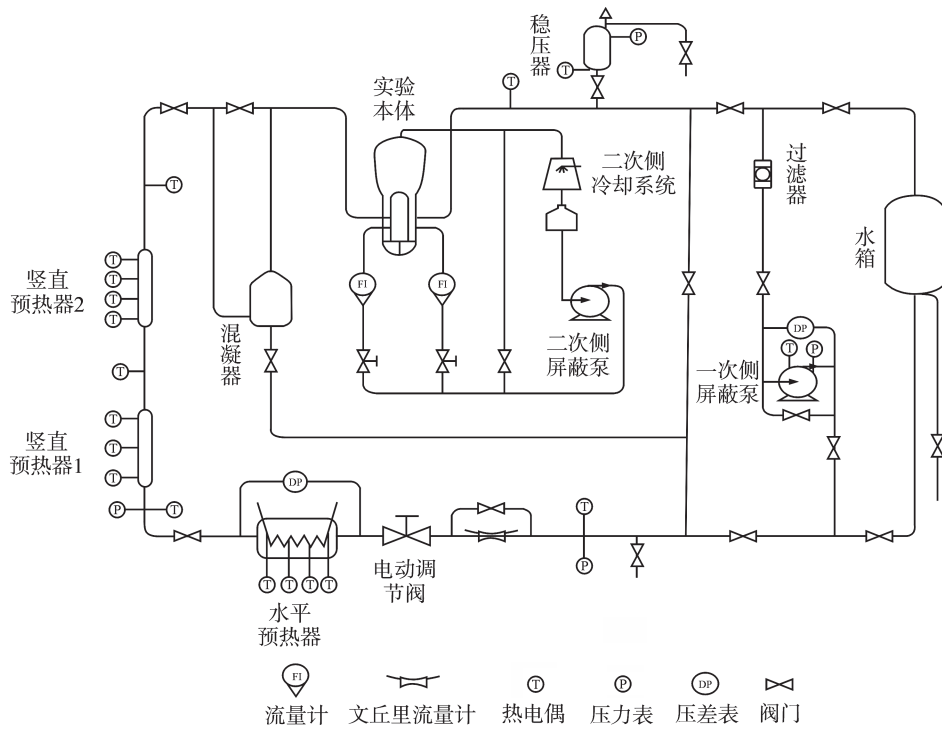


图1 实验系统示意图
Fig. 1 Schematic of Test Facility

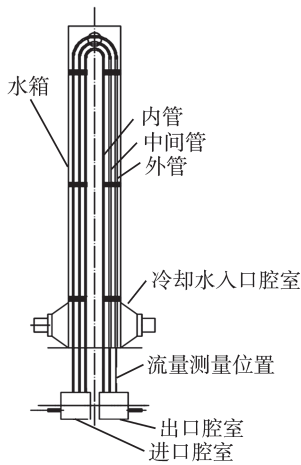


图2 实验本体示意图
Fig. 2 Schematic of Test Section

1.3 实验参数范围

本实验采用控制变量法，在不同的一次侧入口温度、二次侧冷却水流量以及不同电动调节阀开度下进行实验，以研究不同参数对管间脉动临界流速以及倒流临界流速的影响特性。本实验工况范围为：一次侧入口温度为 90~160.5℃；二次侧冷却水流量为 17~43 t/h；电动调节阀开度为 13.5%~100%。

2 管间脉动临界流速与倒流临界流速的对比分析

2.1 临界流速的确定

在系统压力为 1 MPa、二次侧冷却水流量为 37 t/h、电动调节阀开度为 13.5%（回路阻力系数为 766.81）、一次侧入口温度为 145.5℃ 的工况下，3 根 U 型管流速随时间变化曲线见图 3。

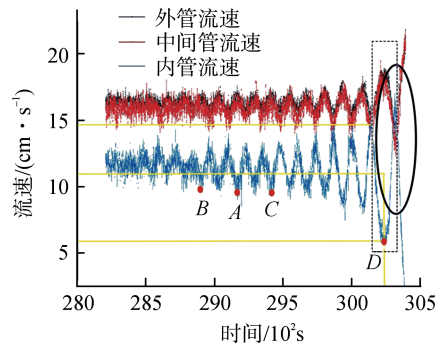


图3 临界流速的判定示意图
Fig. 3 Schematic of Determination of Critical Flow Velocity

由图 3 可知，随着时间的增加，管间脉动逐渐增强；内管脉动相位与另外 2 根管相位差为 180°，而中间管和外管几乎无相位差，两管脉动

幅值之和近似等于内管脉动幅值；在脉动幅值达到一定的值后出现了内管倒流的不稳定现象。在实验本体出现流动不稳定时，总是先出现管间脉动现象（28500~30300 s），取 A 时刻对应的平均流速为管间脉动临界流速，此时的脉动幅值为发生脉动前噪声幅值的 105%。随后，在时间大于 30300 s 后，出现了倒流现象，选取最后半个脉动周期的中位值作为倒流临界点，倒流临界流速取该周期内流速的平均值。需要指出，图中实线包围区域为倒流时 3 根 U 型管的流速变化情况，虚线包围区域为倒流发生前的最后半个周期。在该工况下， D 时刻即为本文定义的倒流临界时刻，倒流临界时刻的流速为该半周期内的平均值，倒流临界流速值约为 11.6 cm/s，而根据流量漂移理论可获得该工况下的临界流速为 11.7 cm/s，因此本文对倒流临界流速的取值是合理的。

2.2 一次侧入口温度对管间脉动临界流速以及倒流临界流速的影响

在系统压力为 1 MPa、二次侧冷却水流量为 37 t/h、电动调节阀开度分别为 13.5% 和 14.7%（回路阻力系数分别为 766.81 和 331.05）的工况下，一次侧入口温度对倒流临界流速和管间脉动临界流速的影响见图 4。

由图 4 可知，在电动调节阀开度一定时，倒流临界流速和管间脉动临界流速随一次侧入口温度的升高而增大。这主要是因为随着一次侧入口温度的升高，一、二次侧温差也不断增加，换热效果随着温差增大而变强，重位压降会随着一次侧入口温度的增加而增加，使得流动不稳定性发生的可能性增大，因此倒流临界流速和管间脉动临界流速随一次侧入口温度的升高而增大。对比 2 种电动调节阀开度下流速变化结果可知，电动调节阀开度较小时，管间脉动临界流速与倒流临界流速更为接近。这主要是由于电动调节阀开度较小时，回路阻力较大，对脉动的抑制效果更强，从而使得管间脉动临界流速与倒流临界流速更为接近。

图 5 为管间脉动临界流速与倒流临界流速的比值 (Q_{QFI}/Q_{rev}) 随一次侧入口温度的变化情况。由图 5 可知，在对应工况范围内， Q_{QFI}/Q_{rev} 变化范围为 1.00~1.09；电动调节阀开度较小且一次侧入口温度较高时，2 者的差别更为显著。

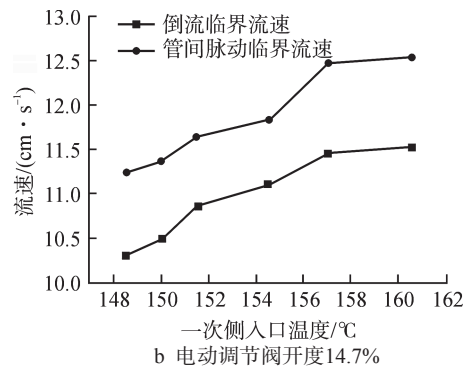
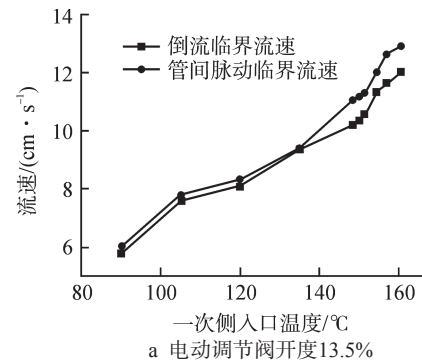


图 4 一次侧入口温度对倒流临界流速和管间脉动临界流速的影响

Fig. 4 Influence of Inlet Temperature of Primary Side on the Critical Velocities of Reverse Flow and Inter-tube Oscillation

2.3 回路阻力系数对管间脉动临界流速以及倒流临界流速的影响

在系统压力为 1 MPa、二次侧冷却水流量为 17 t/h、一次侧入口温度为 145.5℃ 的工况下，回路阻力系数对倒流临界流速和管间脉动临界流速的影响见图 6。

由图 6 可知，回路阻力系数对倒流临界流速的影响较小，但对管间脉动临界流速的影响很大。当回路阻力较小时，管间脉动临界流速显著大于倒流临界流速，随着回路阻力的增大，2 者逐渐接近，表明回路阻力对管间脉动现象具有显著的抑制作用。

图 7 为 Q_{QFI}/Q_{rev} 随回路阻力系数的变化情况。由图 7 可知，该比值的范围变化为 1.02~1.46；回路阻力较小时，倒流临界流速与管间脉动临界流速相差较大；回路阻力较大时，倒流临界流速与管间脉动临界流速之间的几乎无差别。

2.4 二次侧冷却水流量对管间脉动临界流速以及倒流临界流速的影响

图 8 为系统压力 1 MPa、一次侧入口温度

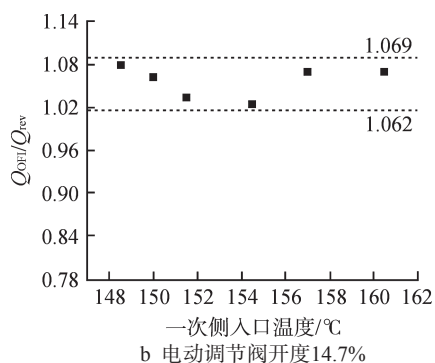
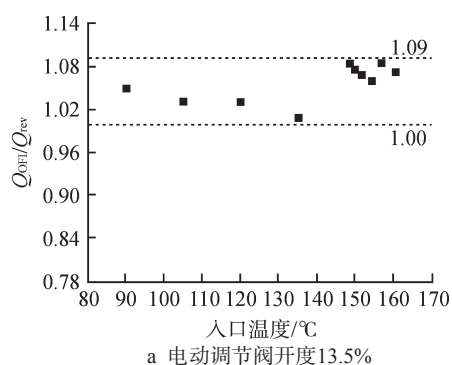
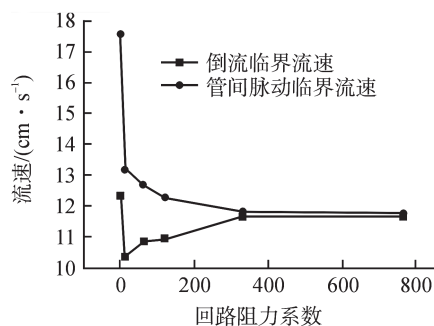
图5 Q_{QFI}/Q_{rev} 随一次侧温度的变化Fig. 5 Variation of Q_{QFI}/Q_{rev} with Inlet Temperature of Primary Side

图6 回路阻力系数对倒流临界流速和管间脉动临界流速的影响

Fig. 6 Influence of Loop Resistance Coefficient on Critical Velocities of Reverse Flow and Inter-Tube Oscillation

145.5℃、电动调节开度为14.7%（回路阻力系数为331.05）时二次侧冷却水流量对倒流临界流速以及管间脉动临界流速的影响。由图8可知，倒流临界流速以及管间脉动临界流速随二次侧冷却水流量的增大而缓慢下降。这主要是因为对应工况下的二次侧流量较大，换热过强，随着二次侧流量的增大，上升段温度下降较多，反而使得重力压降在总压降中的份额减少，提高了系统稳定

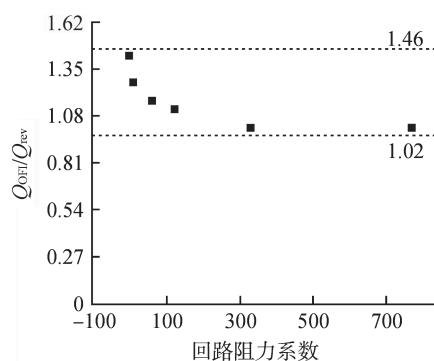
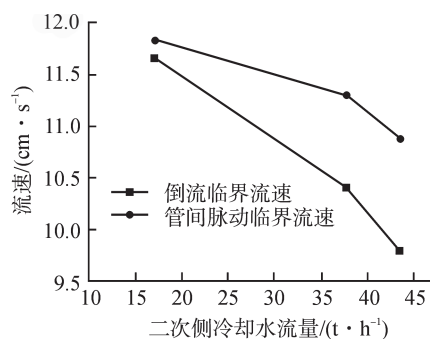
图7 Q_{QFI}/Q_{rev} 随回路阻力系数的变化Fig. 7 Variation of Q_{QFI}/Q_{rev} with Loop Resistance Coefficient

图8 二次侧冷却水流量对倒流临界流速和管间脉动临界流速的影响

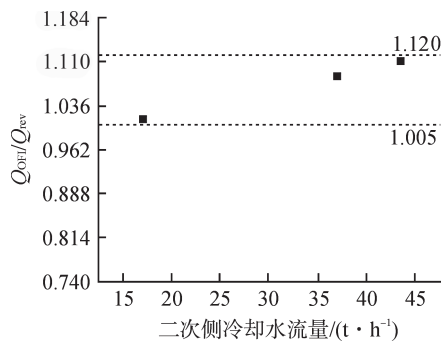
Fig. 8 Influence of Secondary Side Cooling Water Flow on Critical Velocities of Reverse Flow and Inter-tube Oscillation

性。通过对其他工况的研究分析亦得到了同样的变化趋势，由此可得到管间脉动临界流速与倒流临界流速均随着二次侧冷却水流量的增大而减小的结论。

图9为 Q_{QFI}/Q_{rev} 的比值随二次侧冷却水流量的变化情况。由图9可以看出，该比值在1.005~1.120范围内变化。同时可以发现，随着二次侧冷却水流量的增大，该比值一直在增大，但增幅在减小。

3 结论

本文通过实验得到了单相工况下倒流临界流速与管间脉动临界流速随一次侧入口温度、回路阻力系数以及二次侧流量的变化关系。管间脉动临界流速与倒流临界流速均随着一次侧入口温度的升高和回路阻力系数的减小而增大；随着二次侧冷却水流量的增大而减小。同时发现，回路阻

图 9 Q_{QFI}/Q_{rev} 随二次侧冷却水流量的变化Fig. 9 Variation of Q_{QFI}/Q_{rev} with Secondary Side Cooling Water Flow

力对脉动具有显著抑制作用，在回路阻力较小时，可能发生较为严重的管间脉动。通过分析单相工况下管间脉动临界流速与倒流临界流速的关系发现：管间脉动临界总是先于倒流临界发生；管间脉动临界流速总是高于倒流临界流速；2 者比值最高可达 1.46。

参考文献：

- [1] 孙中宁. 核动力设备[M]. 哈尔滨：哈尔滨工程大学出版社，2017: 25-40.
- [2] FUKUDA K, KOBORI T. Classification of two-phase flow instability by density wave oscillation model[J]. *Journal of Nuclear Science & Technology*, 1979, 16(2): 95-108.
- [3] 王冲. 中国实验快堆蒸汽发生器稳态特性分析及热工水力设计[D]. 大连：大连理工大学，2013.
- [4] BOURE J A, BERGLES A E, TONG L S. Review of two-phase flow instability[J]. *Nuclear Engineering & Design*,

1973, 25(2): 165-192.

- [5] KUKITA Y, NAKAMURA H, TASAKA K, et al. 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(4): 289-298.
- [6] SANDERS J. Stability of single-phase natural circulation with inverted U-tube steam generators[J]. *Journal of Heat Transfer*, 1988, 110(3): 735-742.
- [7] 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.
- [8] SHEN M S, YU L, Lin M, et al. Investigation on reverse flow phenomenon in UTSGs with abnormal secondary side water level under single-phase natural circulation[J]. *Progress in Nuclear Energy*, 2020(119): 103180.
- [9] GUO Y, HUANG J, XIA G L, et al. Experiment investigation on two-phase flow instability in a parallel twin-channel system[J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2010, 37(10): 1281-1289.
- [10] 周云龙, 沈增明, 荆建刚, 等. 并联管内高压汽液两相流动密度波不稳定性实验研究[J]. *工程热物理学报*, 1996, 17(S1): 215-218.
- [11] 杨国义. 新版压力容器核心标准——GB 150—2011《压力容器》系列标准导读[J]. *中国质量与标准导报*, 2012(4): 7-9.
- [12] 俞扬. TSG 21—2016《固定式压力容器安全技术监察规程》部分修订内容介绍[J]. *化工机械*, 2017(6): 595-602.

(责任编辑：周 茂)