

非线性振动下水平通道内气液两相流动研究

周云龙, 常 赫*

(东北电力大学 能源与动力工程学院, 吉林省 吉林市 132012)

摘要: 在地震等行为产生的非线性振动下, 两相流体会影响回路传热并对装置结构进行冲击, 因此对气液界面行为的把握对核安全具有十分重要的意义。本文通过将振动装置与两相流实验回路相结合的方法, 对非线性振动下水平通道内气液两相流问题进行了实验研究。基于 FLUENT 平台, 结合动网格模型及 UDF 编程手段建立了数学模型, 并对数学模型进行验证。研究表明: 模拟结果与实验结果具有很好的一致性; 振动工况下气液两相流动形式不同于稳态工况, 会出现更复杂的气液界面, 主要流型有泡状流、弹状流、搅拌流、波状流及环状流; 瞬时摩擦压降的波动幅度随振动幅度和频率的增大而增大, 且与振动幅度相比, 振动频率对其影响更大。

关键词: 非线性振动; 两相流; 数值模拟

中图分类号: TB123

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2019)06-1014-07

doi: 10. 7538/yzk. 2019. youxian. 0112

Study on Gas-liquid Two-phase Flow in Horizontal Channel under Nonlinear Oscillation

ZHOU Yunlong, CHANG He*

(School of Energy and Power Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China)

Abstract: Under nonlinear oscillation caused by seism, two-phase flow will affect loop heat transfer and impact reactor structure, so it is meaningful to study the gas-liquid interface behavior under seismic nonlinear oscillation. According to the method of combining vibration apparatus with two-phase flow experiment loop, the experimental study on gas-liquid two-phase flow in horizontal channel under nonlinear oscillation was conducted. At the same time, based on FLUENT platform, combined with dynamic mesh technique and UDF programming method, the mathematical model was established and verified. The results show that the simulation and experiment results are in reasonable agreement. The flow patterns of gas-liquid two-phase flow under nonlinear oscillation are different from those under steady condition, resulting in more complex gas-liquid interface, and main flow patterns are bead flow, fluctuant slug flow, boiling wave flow,

收稿日期: 2019-03-04; 修回日期: 2019-04-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51541608, 51776033)

作者简介: 周云龙(1960—), 男, 吉林扶余人, 教授, 博士, 从事多相流及传热研究

* 通信作者: 常 赫, E-mail: 469940713@qq.com

网络出版时间: 2019-05-29; 网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2044.TL.20190528.1425.002.html>

wave flow and annular flow. As vibration intensifying, the magnitude of frictional pressure drop increases, showing vibration frequency has a stronger effect on fluctuation than vibration amplitude.

Key words: nonlinear oscillation; two-phase flow; numerical simulation

两相流运动广泛存在于能源、核能、动力、石油、海洋等多种工业领域中,因此预测两相之间复杂的自由界面运动有很大研究价值。近年来随着科学技术向水下潜艇、漂浮式核能设备以及航天领域的深入研究,国内外专家和学者在实验上和数值模拟上对动态条件下管道内流动特性的研究正在逐步开展^[1-4],并取得了一定研究成果。然而因地震等引起的非线性振动条件下的两相流现象尚未得到统一的结论,特别是与反应堆安全相关的研究更是鲜有报道。

在工程实际中,振动工况会引起乏燃料水池、池式快堆、沸水堆堆芯等的自由界面产生振动现象并冲击管道壁面,从而影响组件结构和完整性,及流体与结构间的传热性能,进而影响设备的寿命和安全运行^[5-7]。因此,对动态工况下流体流动情况的研究对确保核反应堆安全运行具有十分重要的实际意义。

随着计算机技术的发展,数值模拟作为一种重要手段广泛应用于各类研究中。由于气液两相界面密度及压力等存在巨大差异,关于气液两相流的数值模拟一直是流动模拟的热点,

其研究重点是运动界面的追踪以及边界条件的构造^[8]。由于通道结构与流体间流固耦合作用的复杂性,对于振动通道内气液两相流动的数值模拟则是少之又少。

基于上述原因,本文通过实验方法研究非线性振动状态下的气液两相流型及流型转换界限。同时利用 FLUENT 框架对振动通道运动进行剖析后,使用 CLSVOF(coupled level set and volume of fluid)方法建立正弦振动下水平通道内气液两相流动数值模拟模型,模拟研究相应工况下流体的流动情况,为后续动态条件下管内传热及两相流动的数学模型奠定基础,以期对振动状态下设备管道的安全运行起到一定的指导作用。

1 实验装置及原理

本实验将如图 1 所示的两相流实验回路与振动装置相结合,对水平通道内气液两相流进行研究分析,实验装置介绍及实验步骤详见文献^[9]。实验段采用管径为 35 mm、长度为 2 m 的透明有机玻璃管,将其水平固定于振动台

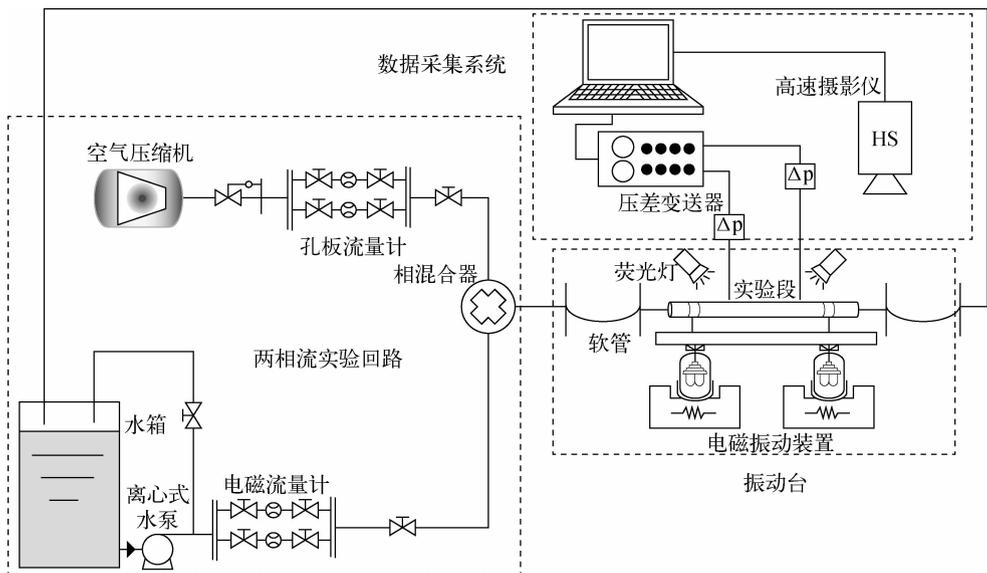
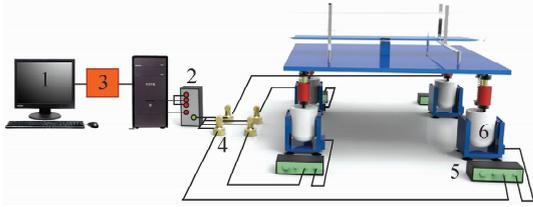


图 1 实验系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

上,如图2所示。两个测压孔分别位于实验段两端,并与压差变送器相连,通过数据采集系统采集数据。实验在常温、常压下进行,振动台的非线性振动形式按正弦规律 $Z = A \sin(\omega t) = A \sin(2\pi f t)$ 振动,其中 A 为振幅, f 为振动频率, Z 为瞬时位移, ω 为角速度, t 为时间。气体体积流量范围为 $0.2 \sim 60 \text{ m}^3/\text{h}$,液相体积流量范围为 $0.3 \sim 7 \text{ m}^3/\text{h}$,利用高速摄影仪记录气液两相流型。



1——工业控制计算机;2——并行采集通道;
3——异步协同控制器;4——电容传感器;
5——数字式开关功率放大器;6——电磁振动装置

图2 非线性振动实验台

Fig. 2 Test bench of nonlinear oscillation

2 数值计算

2.1 控制方程

数值计算方法采用 CLSVOF 方法对气液两相流界面进行追踪,其基础控制方程详见文献[10]。针对本文的动态工况,为解决体积分数 α 的迁移问题,依据 Weller 引入的额外人工压缩项^[11],将体积分数函数方程发展为:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (u\alpha) + \nabla \cdot (u_r \cdot \alpha(1-\alpha)) = 0 \quad (1)$$

式中: u 为流体速度; u_r 为只对界面产生影响的适于压缩界面的速度场^[12],本文将其处理为两相流体的速度差。

对于正弦振动工况下两相流控制方程,采用连续性方程和考虑表面张力的 Navier-Stokes 方程,基本方程详见文献[13]。针对系统在振动状态下所发生的频率很高的微小位移变化,本文假定通道以相同的速度 u_d 运动,此时,流体速度 u 可看作由两部分组成:通道振动速度 u_d 及感应速度 u_c 。此时动量方程发展为:

$$\rho \frac{\partial u_c}{\partial t} + \rho \frac{\partial u_d}{\partial t} + \rho u_c \cdot \nabla u_c =$$

$$-\nabla p + \rho g + \nabla \mu \cdot (\nabla u + (\nabla u)^T) + F_\sigma \quad (2)$$

式中: ρ 为流体密度; p 为通道压强; g 为重力加速度; μ 为流体黏度; F_σ 为 Brackbill 等^[14]提出的表面张力模型。 u_d 可通过位置变化求得。因 u_c 是非空间变化的,这里依据文献[7]采用假设:

$$u_d(u_c \cdot \nabla) = 0 \quad (3)$$

2.2 数学模型

本文依照实验数据使用 PRO.E 进行几何造型,进口管径 r_0 为 27 mm,壁厚 w_0 为 5 mm,通道直径 r_1 为 35 mm,管长 L 为 2 m。利用 ICEM 进行网格划分,对通道壁面附近网格进行边界层细化处理,然后将网格导入 ANSYS FLUENT 15.0 进行三维计算。模拟工况前,对网格进行无关性验证,研究发现网格数对壁面压力几乎没有影响,与 Lim 等^[15]得出的结论一致。因此,通过比较不同网格划分时稳态工况下通道内弹状流的气泡长度,最终确定本文采用网格数为 396 000 的非结构化四面体网格进行计算。几何模型及网格划分如图 3 所示。

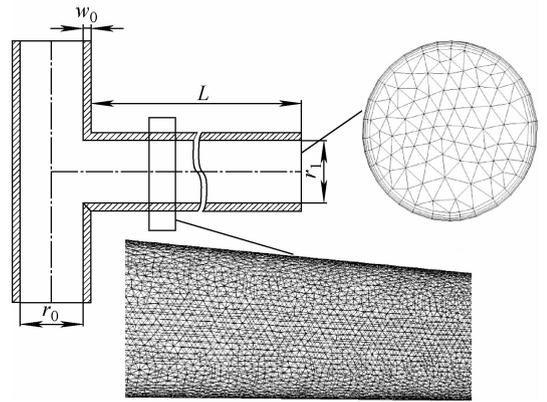


图3 几何模型及网格划分

Fig. 3 Geometric model and mesh geometry

计算过程中,在有限体积法的框架下,采用时间非稳态计算方法,对动量时间方程采取二阶隐式格式,对流项和黏度扩散项采用二阶迎风格式。利用 UDF 编程手段,在动网格模型下实现正弦振动工况下的模拟,其他相关边界条件设置参考文献[16]。每次模拟过程中,为保证收敛,需适当调整时间步长和松弛因子。

2.3 数值方法验证

管内气液两相流动情况随实验段的非线性

运动不断发生变化,借助高速摄影仪观察实验段内流体流动情况可发现,振动状态下水平通道内气液两相流型主要有泡状流、弹状流、搅拌流、波状流及环状流。为验证本文所采用数值方法的可靠性,以振幅为 2 mm、振动频率为 5 Hz 的振动工况为例对数学模型进行验证,模拟条件与文献[17]中的实验一致,其中气相表观速度 j_G 的变化范围为 0.015~12 m/s,液相表观速度 j_L 的变化范围为 0.02~2.5 m/s。根据大量实验和模拟结果,绘制了如图 4 所示的流型图,针对流型定性验证过程,本文以弹状流及波状流为例示于图 4,可发现数值模拟与实验得出的流型特征基本一致。

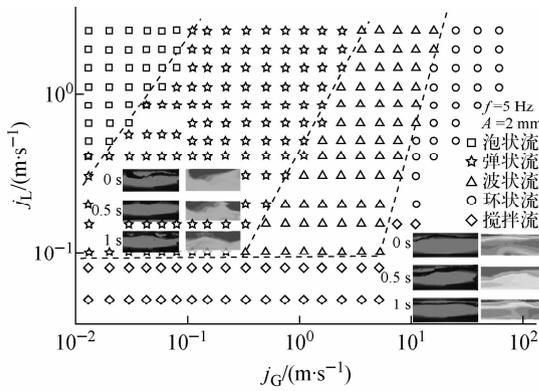


图 4 流型图比较

Fig. 4 Comparison of flow regime

非线性振动通道内的摩擦压降 Δp 可表示为:

$$\Delta p = \Delta p_f + \Delta p_g + \Delta p_a \quad (4)$$

式中: Δp_f 为摩擦压降; Δp_g 为重位压降; Δp_a 为加速压降。由于本文采用水平通道,故 $\Delta p_g = 0$; 实验研究为常温条件下流体流动,故 $\Delta p_a = 0$ 。

为定量验证数值方法的可靠性,针对振动工况下通道内的摩擦压降进行了测量,并与模拟结果进行对比。与此同时,为探讨非线性振动对通道内气液两相流动的影响,本文对相同工况下稳定通道内的摩擦压降也进行了测量与计算。实验与数值计算摩擦压降的对比如图 5 所示,进一步证明了本文所选取的求解算法可正确反映非线性振动工况下通道内气液两相的流动情况。图 5 中, Δp_{fs} 为稳定状态下的摩擦

压降, Δp_{fos} 为振动状态下的摩擦压降。

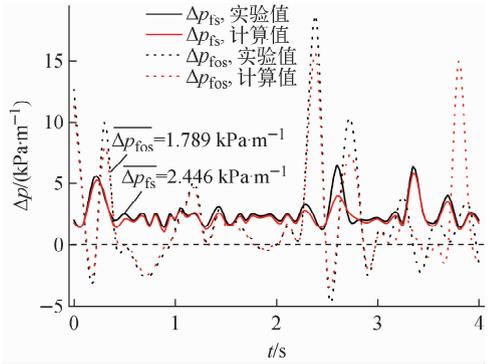


图 5 实验与数值计算的摩擦压降对比

Fig. 5 Frictional pressure drop comparison between experiment and numerical simulation

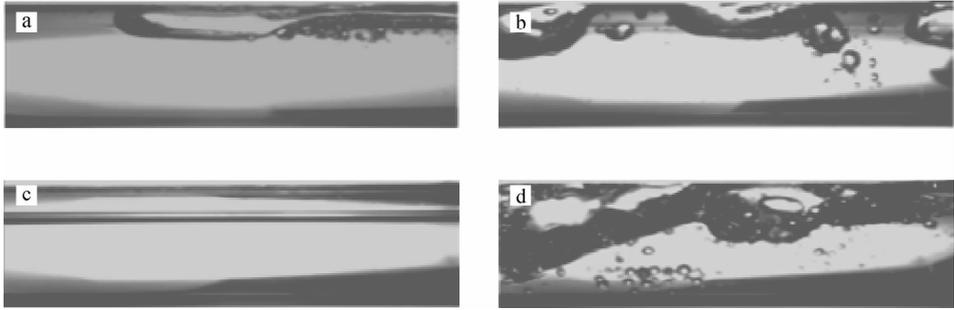
3 结果及分析

3.1 非线性振动对流型的影响

通过对高速摄影仪所采集的正弦形式振动通道内各工况下气液两相流动图像进行分析可发现,与稳定通道内两相流流型特征相比,振动通道内流体的流动情况在气液两相界面分布及不同流型间转换界限等方面均存在一定差异。实验过程中,除一些公认的水平通道内流型如弹状流、波状流、环状流等存在不同外,也发现了几种不同于常规通道的流型。以稳定状态下的弹状流和分层流为例,对稳态与非线性振动下通道内流体流动进行对比,如图 6 所示。

由图 6 可见,非线性振动条件下,弹状流气液两相界面面积会发生变化,相应影响流型特征。稳定状态下的长气弹在振动的影响下,被分割成诸多由小气泡包围的小气弹,随通道的非线性振动间歇性接触通道壁面,或衰减为小气泡,或形成新气弹,从而形成异于常规静态通道的弹状流。与此同时,非线性振动对稳态通道内的典型流型分层流也有很大影响。观察图 6 发现,非线性振动通道内气液两相流动情况近似于波状流,但气液两相界面振动的波纹更加强烈,且在整个通道液相内部都存在大量小气泡。

正弦振动过程大体可分为两部分:在向上振动的过程中,通道内液相受到向上振动时所产生的附加力和自身的重力,此时气相对界面产生的剪切力及管壁产生的阻力不能抵消液相



a, b——弹状流, $j_G=0.09$ m/s, $j_L=0.5$ m/s; c, d——分层流, $j_G=0.1$ m/s, $j_L=0.1$ m/s

a, c——稳定状态; b, d——非线性振动状态

图6 典型流型对比

Fig. 6 Comparison of typical flow regime

所受到的斜向上方向的合力,从而对液相向上运动的趋势无法造成影响;然而在通道向下运动的过程中,其斜向下方向的合力加速了液相向下的运动趋势。换个角度来说,非线性振动相当于给近壁区域流体施加了一沿振动方向上的速度,这样流体的速度就变成原有速度与振动引起的附加速度的合成。综上所述,振动引起的附加惯性力及流体自身重力使得通道内流体流动变得更加复杂,特别是气液两相流速较低时。与之相比,非线性振动对高流速流体的流型影响较小,通道内流型与稳态工况类似。

3.2 非线性振动对摩擦压降的影响

如图5所示,与稳定状态下通道内气液两相流体瞬时摩擦压降相比,非线性振动状态下通道内压差波动信号较为剧烈,波动信号变化频率较快,且具有更大的波动幅值。其原因在于非线性振动引起的流动不稳定性与管内气液两相流体的相对运动共同影响了压差波动信号。然而稳定状态下通道内的平均压降梯度为 2.446 kPa/m,非线性振动状态下为 1.789 kPa/m,减小了 36% 。为进一步探讨非线性振动对通道内气液两相流动的影响,本文采集了不同 Re 下的摩擦压降,结果如图7所示。图7中, λ 为摩擦阻力系数。由图7可看出,瞬时摩擦压降波动规律与 Re 关系不大,因此不能通过 Re 的大小判断摩擦压降的大小。然而,通过比较不同流速下摩擦压降峰值出现的时间,可发现流速越大峰值出现越晚。同时 λ 随 Re 的增大而减小,说明非线性振动状态下平均摩擦阻力系数依然和 Re 呈反比。

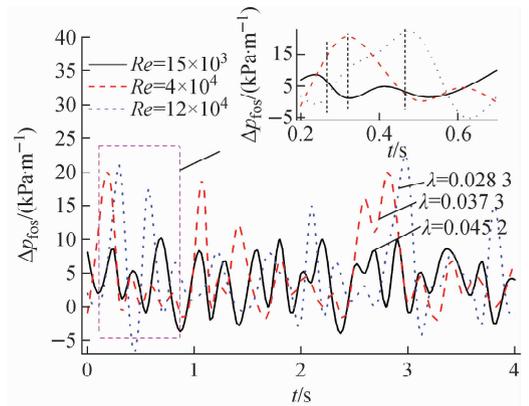


图7 Re 对摩擦压降的影响

Fig. 7 Effect of Re on frictional pressure drop

与此同时,为进一步探讨非线性振动相关参数对通道内气液两相流动的影响,本文对相同流速下不同振动参数时的摩擦压降进行了模拟计算,结果如图8所示,其中 $A2f2$ 代表振动幅度为 2 mm,振动频率为 2 Hz。由图8可见,振动参数对摩擦压降具有一定影响。当振动频率从 2 Hz 增至 16 Hz 时,瞬时摩擦压降波动幅度从 $-207.2\% \sim 344.3\%$ 变化至 $-203.9\% \sim 405.3\%$,幅值增加 10.4% 左右,说明振动频率对瞬时摩擦压降的波动幅度及频率均有较为显著的影响;当振动幅度从 2 mm 增至 10 mm 时,瞬时摩擦压降的波动幅度从 $-132.2\% \sim 309.7\%$ 变化至 $-155.8\% \sim 324.9\%$,幅值增加 6.8% ,说明振动幅度对摩擦压降无明显影响。

对此现象进行分析如下。通常情况下,稳定状态下通道内气液两相流动压降受到壁面性质和 Re 的影响,与之相比,当通道做非线性振

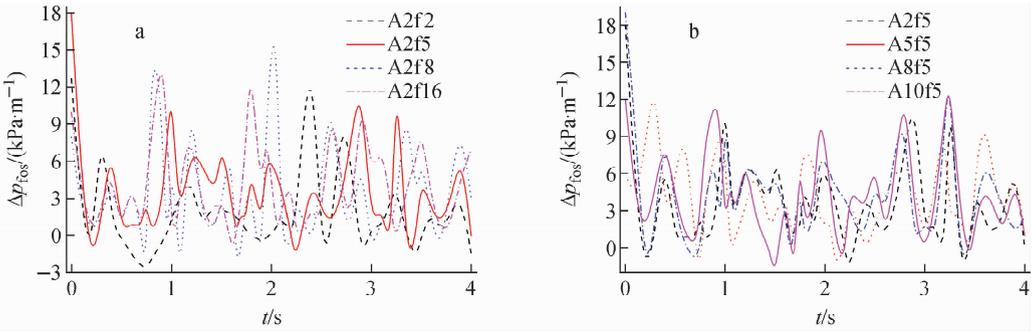


图8 振动频率(a)和幅度(b)对摩擦压降的影响

Fig. 8 Effect of vibration frequency (a) and vibration amplitude (b) on frictional pressure drop

动时,在通道壁面很薄的区域内会产生瞬时的脉动涡流及巨大的脉冲速度,同时由于这一区域的非线性相互作用,从而破坏了壁面附近流动边界层。振动幅度和频率越大,对原有流场影响越大,流动越紊乱,流线偏离原流动方向的程度越大,相应迅速增大流场静压。

区域振动时,流场结构会发生变化,流动速率也会随振动参数的改变而改变。小振幅低频率时,流动速率上升缓慢,同时大尺度旋涡变成小尺度,小尺度旋涡破碎进而随主流运动;大振幅高频率时,流动速率迅速增大,大尺度旋涡也会发生破碎,直至被主流带走。因此,高频率时通道摩擦压降变化更加明显。

综上所述,对非线性振动通道内气液两相流动行为的把握对确保核反应堆安全具有十分重要的实际意义。

4 结论

本文通过将实验与数值模拟相结合的方式,对非线性振动水平通道内气液两相流动行为进行了探讨与研究,得出如下结论。

1) 常温常压条件下,非线性振动工况下水平通道内气液两相流型与稳态时有所不同,主要流型有泡状流、弹状流、搅拌流、波状流及环状流。

2) 与稳定状态下水平通道内气液两相流相比,非线性振动状态下会出现更复杂的气液界面,且瞬时摩擦压降波动较大,平均摩擦阻力系数与 Re 呈反比。

3) 瞬时摩擦压降波动规律与 Re 关系不大,然而通过比较不同流速下摩擦压降峰值出

现的时间,可发现流速越大峰值出现得越晚。

4) 非线性振动状态下,瞬时摩擦压降的波动幅度与振动参数的变化呈正比,与振动幅度相比,振动频率对其影响高出4%。

参考文献:

- [1] TIAN W S, CAO X X, YAN C Q. Experimental study of single-phase natural circulation heat transfer in a narrow, vertical, rectangular channel under rolling motion conditions[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2017, 107(5): 592-606.
- [2] 刘赵森,刘佳. 不同重力下90°弯管内气液两相流及流动特性研究[J]. 力学学报, 2015, 47(2): 223-230.
LIU Zhaomiao, LIU Jia. Study on flow pattern and flow characteristics of gas-liquid two-phase flow in 90 degree bend under different gravity [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2015, 47(2): 223-230(in Chinese).
- [3] 陈冲,高濮珍. 摇摆工况下窄矩形通道内两相沸腾摩擦压降特性[J]. 化工学报, 2015, 66(10): 3 874-3 880.
CHEN Chong, GAO Puzhen. Frictional pressure drop characteristics of two phase boiling in narrow rectangular channel under swing condition [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2015, 66(10): 3 874-3 880(in Chinese).
- [4] 肖秀,朱庆子,王冠轶. 振动工况下环管内气液两相流参数分布实验研究[J]. 原子能科学技术, 2017, 51(1): 19-25.
XIAO Xiu, ZHU Qingzi, WANG Guanyi. Experiment investigation on two-phase flow parameter distribution in annular channel under vibra-

- tion condition[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2017, 51(1): 19-25(in Chinese).
- [5] 马晓旭,田茂诚,张冠敏. 水平管内气液两相流诱导振动的数值模拟[J]. 振动与冲击, 2016, 35(16): 204-210.
MA Xiaoxu, TIAN Maocheng, ZHANG Guanmin. Numerical investigation on gas-liquid two-phase flow-induced vibration in a horizontal tube [J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(16): 204-210(in Chinese).
- [6] YU J C, LI Z X, ZHAO T S. An analytical study of laminar heat convection in a circular pipe with constant heat flux[J]. International Journal of Heat Mass Transfer, 2004, 47(7): 5 297-5 301.
- [7] WATANABE T. On the numerical approach for simulating reactor thermal hydraulics under seismic conditions[J]. Annals of Nuclear Energy, 2012, 49: 200-206.
- [8] 覃柏英,林贤坤,荣吉利. 气液两相流稳态的高精度数值模拟[J]. 振动与冲击, 2016, 35(9): 79-85.
QIN Boying, LIN Xiankun, RONG Jili. High precision numerical simulation for gas-liquid two-phase flow[J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(9): 79-85(in Chinese).
- [9] 周云龙,李珊珊. 起伏振动状态下倾斜管气液两相流型实验研究[J]. 原子能科学技术, 2018, 52(2): 262-268.
ZHOU Yunlong, LI Shanshan. Experiment investigation on gas-liquid two-phase flow pattern in inclined pipe under fluctuant vibration condition[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2018, 52(2): 262-268(in Chinese).
- [10] 周云龙,常赫. 壁面性质对蛇形微通道流动特性的影响[J]. 原子能科学技术, 2017, 51(1): 27-32.
ZHOU Yunlong, CHANG He. Numerical simulation on flow pattern of gas-liquid two-phase flow in serpentine micro-channel[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2017, 51(1): 27-32(in Chinese).
- [11] 曾允庆,蔡杰进. 非线性振动下两相自由液面行为模拟[C]//中国核科学技术进展报告. 北京: 原子能出版社, 2013.
- [12] RUSCHE H. Computational fluid dynamics of dispersed two-phase flows at high phase fractions [D]. London: Imperial College of London, 2002.
- [13] ZHOU Y L, CHANG H, QI T Y. Gas-liquid two-phase flow in serpentine microchannel with different wall wettability[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2017, 25(7): 874-881.
- [14] BRACKBILL J U, KOTHE D B, ZEMACH C. A continuum method for modeling surface tension [J]. Journal of Computational Physics, 1992, 100: 335-354.
- [15] LIM Y S, YU S C M. Numerical simulations of heat transfer characteristics of gas-liquid two-phase flow in microtubes[J]. International Journal of Heat Mass Transfer, 2014, 86: 115-124.
- [16] 周云龙,常赫. 小曲率蛇形微通道弯头处弹状流流动及传质特性的数值研究[J]. 化工学报, 2017, 68(1): 97-103.
ZHOU Yunlong, CHANG He. Numerical simulation of gas-liquid flow and mass transfer in curve part of serpentine microchannel with small curvature[J]. CIESC Journal, 2017, 68(1): 97-103(in Chinese).
- [17] 周云龙,赵盘,杨宁. 振动状态下水平管内气液两相流流型转变的实验研究[J]. 热能动力工程, 2017, 32(6): 17-22.
ZHOU Yunlong, ZHAO Pan, YANG Ning. Experimental study on flow pattern transition of gas liquid two-phase in horizontal tubes under vibration condition[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2017, 32(6): 17-22 (in Chinese).