

Numerical Investigation of Cryogenic Two-Phase Flow Geysering Phenomenon in Vertical Tube

Kangjie Sun^{1*}, Shuhua Wang², Jing Wang¹

¹School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai

²Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai

Email: sunkangjie@sjtu.edu.cn

Received: Jan. 16th, 2015; accepted: Feb. 1st, 2015; published: Feb. 4th, 2015

Copyright © 2014 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

The geysering phenomenon at different conditions in the vertical pipe is studied by CFD simulation. The results show that the slug bubble changes into the lump bubble and moves to the top level when it moves into the pool. When the bubble overflows the top level, the liquid droplet is splashed, and the liquid level changes periodically. The length characteristics of slug bubble are performed in cryogenic vertical geysering phenomenon. The geysering cannot be occurred when the length of slug bubble is too small. With the length of slug bubble is increased, the intensity of geysers is huger. The pressure frequency and intensity are increased when the number of Taylor bubble is increased.

Keywords

Taylor Bubble, Geysering, Cryogenic, CFD

低温两相流垂直管内间歇泉现象的数值模拟研究

孙康杰^{1*}, 王淑华², 王 经¹

¹上海交通大学机械与动力工程学院, 上海

*通讯作者。

²中国科学院上海应用物理研究所, 上海
Email: sunkangjie@sjtu.edu.cn

收稿日期: 2015年1月16日; 录用日期: 2015年2月1日; 发布日期: 2015年2月4日

摘要

本文通过数值模拟方法对垂直管内间歇泉现象进行了研究。研究了不同工况下垂直管内间歇泉的变化规律。结果表明, 弹状气泡由垂直管内进入上部存储罐时, 破碎成为为团状气泡并向上方液面移动, 在移动过程中团状气泡发生破碎, 在溢出液面时发生液滴溅出, 且液面高度发生周期性变化。当初始弹状气泡长度过小不会引发间歇泉现象。随着弹状气泡长度增大, 间歇泉的强度增大。当垂直管内存在多个弹状气泡时, 随着管内弹状气泡的增多, 压力波动的频率增大, 压力值整体增大。

关键词

弹状气泡, 间歇泉, 低温, CFD

1. 引言

随着 21 世纪航天技术的大力发展, 大推力运载火箭技术得到广泛应用。大推力运载火箭多采用液氢液氧作为推进剂, 因此, 液氢液氧等低温液体在运输过程中的稳定性越来越被人们所重视, 并成为传输工程成败的关键。低温液体在运输过程中会产生间歇泉现象[1], 是指当低温液体在垂直管路运输过程中, 由于外部容器漏热作用发生气化现象并产生气泡, 当气泡不断增加会产生管路阻塞, 并将液体挤出管路从而发生类似喷泉的现象, 与此同时, 管路上方的液体由于重力作用重新冲入管路, 并且与管内的气体发生冷凝作用, 并产生类似水锤的压力波动, 这种压力波动会损害阀门、管路等部件[2] [3]。

自上世纪 50 年代起, 间歇泉现象在多相流领域被很多学者所重视, Murphy [4] 针对长管路中的间歇泉展开了实验研究, 给出了间歇泉和非间歇泉区别的曲线及经验公式。Kuncoro [5] 采用水和 R113 作为工质, 测量出了管内发生间歇泉时的温度和压力分布数值, 并认为间歇泉主要是由于液体过热所引起的, 间歇泉产生的原因和管路的几何结构及温度分布有直接影响。Takashi [6] 采用水作为工质, 研究了间歇泉产生的频率和强度, 并用声波来控制间歇泉的产生。Khazaee [7] 以家村作为工质, 研究了管壁温度与间歇泉产生周期的关系, 并得出了两者的经验公式。Morioka [8] 以 R113 作为工质, 研究了从底部和顶部向储存罐中添加 R113 时的间歇泉现象, 得出了漏热量与流体速度的经验公式, 并指出了间歇泉发生的主要区域。Angelo [9] 在 NASA 的报告中为了避免低温液体在运输工程中间歇泉的危害, 研究了几种不同的储存罐对低温液体运输的影响。Tong [10] 通过实验手段研究了间歇泉产生过程中气泡的产生规律, 提出间歇泉气泡的产生分为两个阶段, 分别为产生阶段和生长阶段, 并根据动力学方程列出了气泡脱离的经验公式。在此基础上, Mikic [11] 得到了统一的两阶段增长经验公式。

综上所述, 间歇泉的流动具有复杂性和不稳定性等特点, 特别是在低温液体工质中的间歇泉研究需要深入研究, 本文在前人研究的基础上使用实验手段和数值模拟手段, 对低温下垂直管路的间歇泉现象进行了实验和数值模拟研究, 研究了气泡进入上部储存罐时气泡的破碎、聚合现象及底部的压力变化, 为进一步研究低温液体运输安全提供可靠依据。

2. 数学模型及计算方法

本文选用 VOF 方法进行数值模拟, 在每个控制体积单元里, 所有相的体积分数之和等于 1。假设用

α_q 表示第 q 相的体积分数, 则在某控制体积单元, α_q 的值有下列三种情况: $\alpha_q = 0$ 、 $\alpha_q = 1$ 或 $0 < \alpha_q < 1$, 分别表示该单元没有第 q 相、该单元只有第 q 相或该单元是有第 q 相和其它相的自由表面单元, 且 α_q 满足方程

$$\sum_{q=1}^n \alpha_q = 1 \quad (1)$$

式中: n 表示总相数。

每个控制体内混合流体的密度可表示为: $\rho = \sum \alpha_q \rho_q$; 每个控制体内混合流体的粘性可表示为: $\mu = \sum \alpha_q \mu_q$ 。

各相之间界面的跟踪可通过求解体积分数的连续方程来完成:

$$\frac{\partial \alpha_q}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \alpha_q = \frac{S_{\alpha_q}}{\rho_q} \quad (2)$$

对于基本相, 其体积分数不是体积分数方程(2)求得的, 而是由方程(1)得到。

VOF 法在计算多相流时, 只求解单一的动量方程, 得到的速度场为各相共享, 而各相的体积分数对动量方程的影响是通过属性 ρ 和 μ 反映到动量方程中的, 如式(3)所示:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{v}) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \mathbf{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu(\nabla \mathbf{v} + \nabla \mathbf{v}^T)] + \rho \mathbf{g} + \mathbf{F} \quad (3)$$

3. 间歇泉数值模拟

本文使用 FLUENT 软件对垂直管路中的间歇泉现象进行数值模拟, 并假定气泡进入存储罐时气泡长度不发生变化, 气相和液相的温度相同, 两相之间不发生传热和传质现象。几何模型与图 2 中几何模型一致, 采用四边形网格, 经过网格无关性测试后, 采用网格数 34,026 的网格进行分析。两相流模型采用几何重构 VOF 模型, 每个相的体积分数之和为 1。采用 PISO 法对压力和速度进行耦合, 表面张力采用 Brackbill [12] 表面张力模型, 其 Courant 数为 0.25。边界条件和初始条件如图 1 所示, L_s 为气泡长度, b 为液膜厚度, Δy 为气泡间距, 壁面采用无滑移边界条件, 存储罐出口为标准大气压。液相工质为液氮, 其密度为 807.779 kg/m^3 (0 kPa), 粘度为 $0.164 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$, 气相工质为氮蒸汽和空气, 空气密度为 $1.185 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, 粘度为 $1.79 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$, 氮蒸汽密度为 $4.572 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, 粘度为 $5.2557 \times 10^{-6} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 。

4. 结果分析

图 2 为管路直径为 0.018m, 长度为 5.5 mm 单弹状气泡运动图像和瞬态压力图, a、b、c、d 的图像与压力图中的 a、b、c、d 相对应。可以看出, 弹状气泡进入存储罐后向上部液面移动, 在移动过程中形成团状气泡, a、b、c 处的压力波动较小, d 处的压力波动值最大, 幅度为 0.093 kPa, 此时无间歇泉现象发生。

图 3 为管路直径为 0.018 m, 长度为 7.6 mm 单弹状气泡运动图像和瞬态压力图, a、b、c、d 的图像与压力图中的 a、b、c、d 相对应。可以看出, 气泡的运动轨迹与图 5 中一致, 最大压力波动幅度为 1.098 kPa, 此时无间歇泉现象发生。

图 4 为管路直径为 0.018 m, 长度为 10 mm 单弹状气泡运动图像和瞬态压力图, a、b、c、d 的图像与压力图中的 a、b、c、d 相对应。可以看出, 弹状气泡进入存储罐后向上部液面移动, 在移动过程中形成团状气泡, a、b、c 相应压力的波动幅度较小, d、e、f、g 相应压力的压力波动很大, g 点之后压力的波动幅度又变小。最大压力波动幅度为 1.2 kPa, 说明已有间歇泉现象发生。

图 5 为管路直径为 0.018 m 的连续多个弹状气泡底部压力的实验结果与数值模拟对比图, 可以看出,

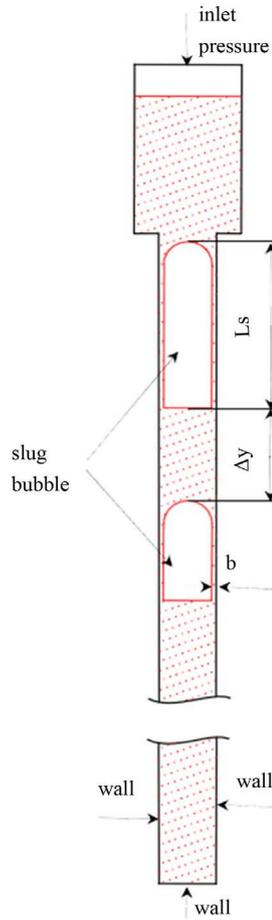


Figure 1. The boundary conditions of computational domain
图 1. 计算区域的边界条件

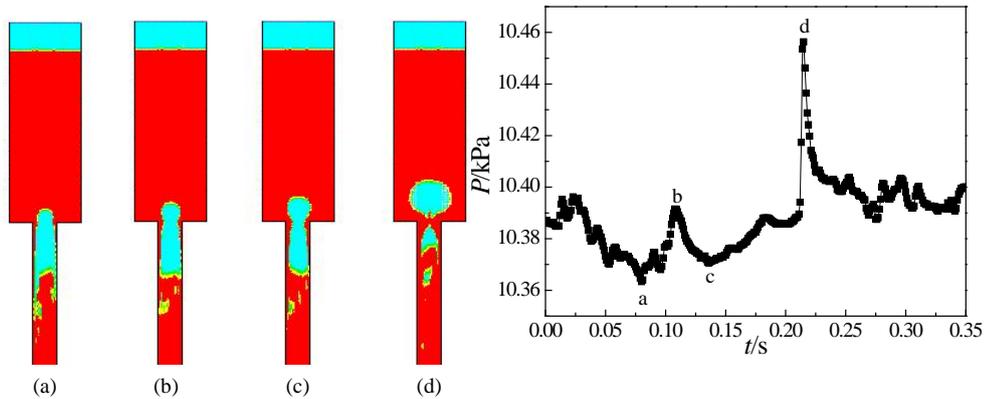


Figure 2. Bubble motion picture and pressure time series with $D = 5.5 \text{ mm}$
图 2. 单弹状气泡长度为 5.5 mm 时气泡运动图像和压力时序图

单个气泡时，压力波动在 0.2 s 处有波动值，其峰值为 10.46 kPa，当管内弹状气泡增多时，其整体压力幅值增大，压力波动的频率增大，数值模拟结果与实验结果相比，趋势相吻合，这是因为实验过程中无法确定弹状气泡的个数，因此只能通过压力幅值的趋势进行比较。

图 6 为初始气泡长度为 10 mm 时，不同的系统压力下管路底部与系统压力之间的关系，可以看出，

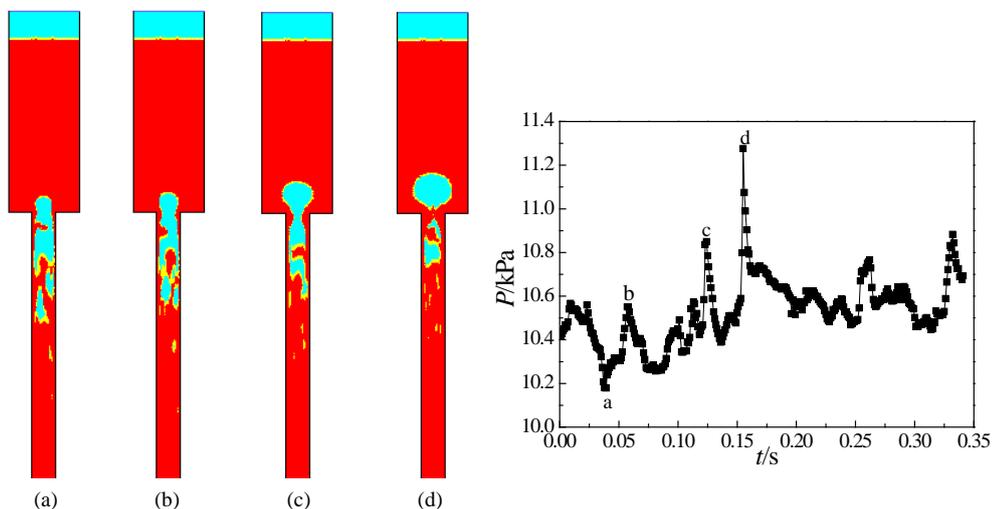


Figure 3. Bubble motion picture and pressure time series with $D = 7.6$ mm
图 3. 单弹状气泡长度为 7.6 mm 时气泡运动图像和压力时序图

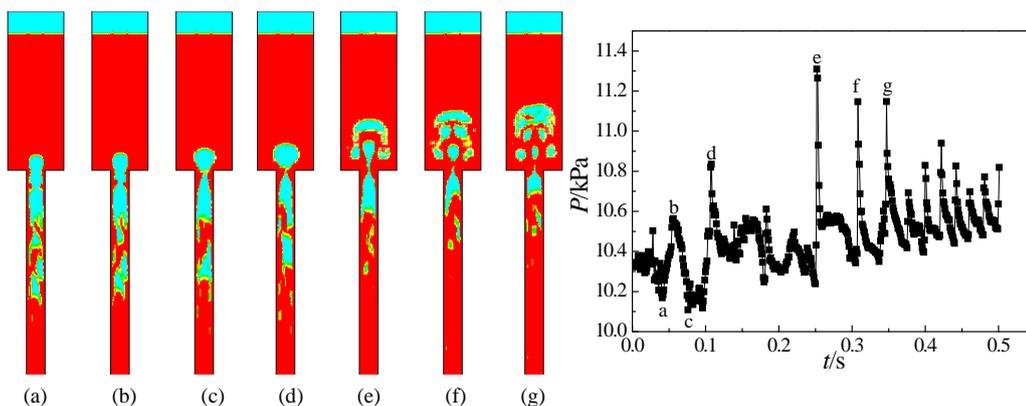


Figure 4. Bubble motion picture and pressure time series with $D = 10$ mm
图 4. 单弹状气泡长度为 10 mm 时气泡运动图像和压力时序图

随着系统压力的增大，压力波动频率降低，压力信号的波动幅度减小，这表明大的系统压力能抑制间歇泉的发生。

5. 结论

本文采用数值模拟相结合的方法对垂直管路内的间歇泉现象进行了可视化动态特性研究，得到以下结论：

- 1) 弹状气泡由垂直管内进入上部存储罐时，破碎成为团状的大气泡，并沿着储罐中心位置向液面移动，在移动过程中，团状气泡发生破碎，并产生摇摆，最终溢出液面，液面伴随有液滴溅出，且液面高度发生周期性变化。
- 2) 长径比较小、热流密度很大工况下不会产生间歇泉。
- 3) 不同长度的弹状气泡对间歇泉有直接影响，当初始弹状气泡长度较小时，弹状气泡进入上部贮罐破碎成一个大的球团状气泡，引起管路底部压力波动较小，即间歇泉的强度小；初始弹状气泡长度较大时，弹状气泡进入上部贮罐破碎成多个大的云团状气泡，引起管路底部压力波动较大，即间歇泉的强度大。
- 4) 当垂直管内存在多个弹状气泡时，随着管内弹状气泡的增多，压力波动的频率增大，压力值整体

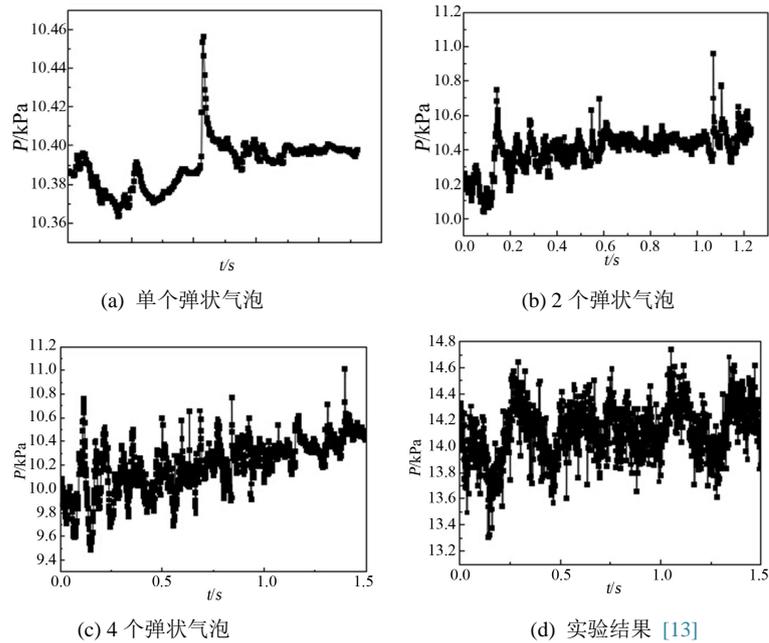


Figure 5. Compare between multiple consecutive slug bubbles simulation results and experimental data

图 5. 多个连续弹状气泡模拟结果与实验数据的对比

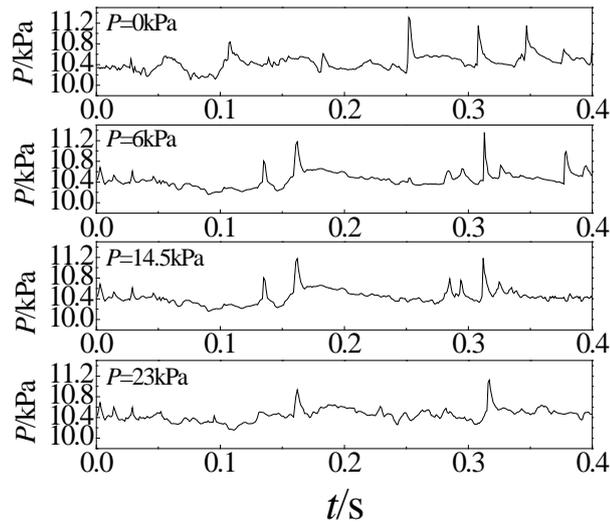


Figure 6. Dynamic pressure signals at the bottom of the tube with different system pressure

图 6. 不同系统压力下管路底部的动态压力信号

增大

基金项目

国家自然科学基金资助项目(50476015)。

参考文献 (References)

- [1] Sou, A. and Nakajima, T. (2002) Numerical analysis of geysering, Kruger park. *1st International Conference on Heat*

Transfer, Fluid Mechanics, and Thermodynamics, **4**, 8-10.

- [2] Ring, E. (1964) Rocket propellant and pressurization systems. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 85-101.
- [3] 张亮, 林文胜, 鲁雪生等 (2002) 低温液体输送系统间歇泉现象机理分析与消除措施. *低温与超导*, **2**, 1-6.
- [4] Murphy, D.W. (1965) An experimental investigation of geysering in vertical tubes. *Advances in Cryogenic Engineering*, **10**, 353-359.
- [5] Kuncoro, H., Rao, Y.F. and Fukuda, K. (1995) An experimental study on the mechanism of geysering in a closed two-phase thermosyphon. *International Journal of Multiphase Flow*, **21**, 1243-1252.
- [6] Fujii, T., Fukuda, H., Kimoto, H., et al. (2003) Control of geyser phenomenon in water column by ultrasonic cavitation. *5th International Symposium on Cavitation (CAV2003)*, Osaka, 1-4 November 2003, 1-8.
- [7] Khazaei, I., Hosseini, R. and Noie, S.H. (2010) Experimental investigation of effective parameters and correlation of geyser boiling in a two-phase closed thermosyphon. *Applied Thermal Engineering*, **30**, 406-412.
- [8] Diblasi, G.A. (1992) Operationally efficient propulsion system study (OEPSS) data book, Vol IX, NAS10-11568-(Mod.8).
- [9] Diblasi, G.A. (1992) Operationally efficient propulsion system study (OEPSS) data book, Vol IX, NAS10-11568(Mod.8).
- [10] Tong, L.S. 著, 王孟浩译 (1980) 沸腾传热和两相流动. 机械工业出版社, 北京.
- [11] Mikic, B.B., Rohsenow, W.M. and Griffith, P. (1970) On bubble growth rates. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **13**, 657-666.
- [12] Brackbill, J.U., Kothe, D.B. and Zemach, C. (1992) A continuum method for modeling surface tension. *Journal of Computational Physics*, **100**, 335-354.
- [13] 王淑华 (2010) 垂直管路中低温两相流间歇泉现象及其动态特性的研究. 博士学位论文, 上海交通大学, 上海.

汉斯出版社为全球科研工作者搭建开放的网络学术中文交流平台。自2011年创办以来，汉斯一直保持着稳健快速发展。随着国内外知名高校学者的陆续加入，汉斯电子期刊已被450多所大中华地区高校图书馆的电子资源采用，并被中国知网全文收录，被学术界广为认同。

汉斯出版社是国内开源（Open Access）电子期刊模式的先行者，其创办的所有期刊全部开放阅读，即读者可以通过互联网免费获取期刊内容，在非商业性使用的前提下，读者不支付任何费用就可引用、复制、传播期刊的部分或全部内容。

