

文章编号:1000-8055(2012)07-1511-06

垂直上升弹状流中弹状氢气泡运动速度

宋建军¹, 杜小平², 赵继广³

- (1. 装备指挥技术学院 研究生院, 北京 101416;
2. 装备指挥技术学院 装备采办系, 北京 101416;
3. 装备指挥技术学院 航天装备系, 北京 101416)

摘 要: 针对垂直管路内气液两相流实验化困难的问题, 运用建模仿真的方法建立了竖直管路中弹状流气泡的运动模型, 模拟了弹状氢气泡在垂直管路的上升过程, 并对其运动速度进行了研究。仿真结果表明: 在静置的竖直管道内, 充分发展的弹状氢气泡的速度基本上以 0.2265 m/s 的速度匀速上升; 弹状氢气泡在流动液氢中运动时, 其速度模型中的速度系数与流体的速度有关, 当雷诺数从 220 上升到 6400 时, 其系数的值从 1.83 下降到 1.14; 在未充分发展的弹状流系统中, 气泡间距对气泡速度分布有着影响, 其上升速度随着气泡间距的减小而增大。

关 键 词: 弹状流气泡; 液氢; 弹状流; 上升速度; 数值模拟

中图分类号: V43; O359

文献标志码: A

Rising velocity of Taylor hydrogen bubble in upward vertical slug flow

SONG Jian-jun¹, DU Xiao-ping², ZHAO Ji-guang³

- (1. The Graduate University of Academy of Equipment, Beijing 101416, China;
2. The Equipment Acquisition Department of Academy of Equipment, Beijing 101416, China;
3. The Aerospace Equipment Department of Academy of Equipment, Beijing 101416, China)

Abstract: Aiming at the difficulties of gas-liquid flow experiment in the vertical pipe, the modeling and simulation methods were conducted to investigate the dynamic model of slug flow and the rising velocity of Taylor hydrogen bubble in upward vertical slug flow. Simulation results show that the velocity of the developed Taylor hydrogen bubble is $0.2265 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. In flowing liquid, the velocity coefficient is insensitive to the liquid Reynolds number. As the Reynolds number based on the liquid velocity, the Reynolds number increases from 220 to 6400, and the velocity coefficient decreases from 1.83 to 1.14. In developing Taylor bubble, the rising velocity increases with the shortening distance between consecutive bubbles.

Key words: Taylor bubble; liquid hydrogen; slug flow; rising velocity; numerical simulation

随着现代空间技术的发展, 对火箭的运载质量和发射高度的要求进一步提高, 开展大比冲的

低温液体火箭的研究显得极为重要。但由于输送管路漏热、震动等原因, 液体在输送过程中会有气

收稿日期: 2011-07-22

网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2297.V.20120801.1438.201207.1511_010.html

基金项目: 预研基金(20094104002, 20104106007); 国家高技术研究发展计划(2008AA1088)

作者简介: 宋建军(1981—), 男, 北京人, 工程师, 博士生, 主要从事兵器发射理论与技术的研究。E-mail: jianjun_s@163.com

泡产生, 气泡不断增多、聚合, 最后形成阻塞管路的弹状流气泡. 弹状流气泡的产生给低温设备的安全运行监控带来了困难, 同时也对多相流科学理论在低温工程中的应用提出了新的挑战.

目前国内外对弹状流气泡的研究比较多, 但大部分都是在常温状态下, 以空气-水为工质对弹状流气泡的研究, 低温状态比较少. 低温状态下对弹状流气泡的研究主要采用实验的方法, 以液氮为工质. 张华等^[1]使用高速动态分析仪对低温倾斜上升管内不同位置处弹状气泡进行了可视化实验研究, 运用统计分析的方法给出了弹状氮气泡运动速度的变化规律; 李祥东等^[2]搭建了可视化实验台, 详述了低温液氮在垂直输送管路中的气泡的聚合及弹状氮气泡的形成过程; Morgan

等^[3], Murphy 等^[4]和 Burkhalter 等^[5]通过实验的方法对低温流体传输过程中由于弹状流气泡引发的间歇泉问题进行了研究, 拟合出了能够区分间歇泉与非间歇泉区的 Murphy 曲线.

本文在前人研究的基础上, 针对低温液氢的特性, 对垂直上升管弹状流中的弹状氢气泡的运动速度进行数值模拟, 分析不同状态下的弹状氢气泡的运动速度, 为进一步探究圆管内低温液氢沸腾两相弹状流发展过程中的流动特性提供参考.

1 气泡动力学方程及相关速度模型

1.1 基本控制方程

气泡的运动充分考虑表面张力与黏度的影响, 采用 Rayleigh-Plesset 动力学方程^[6]

$$\frac{p_v - p_l}{\rho_l} = R \frac{d^2 R}{dt^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{dR}{dt} \right)^2 + \frac{4v_l dR}{R dt} + \frac{2\sigma}{\rho_l R} \quad (1)$$

流体动力学计算采用牛顿流体运动基本方程

1) 连续性方程

$$\frac{\partial}{\partial t} [(1 - \varphi)\rho_l + \varphi\rho_v] + \nabla \cdot [(1 - \varphi)\rho_l \mathbf{v}_l + \varphi\rho_v \mathbf{v}_v] = 0 \quad (2)$$

2) 质量转移方程

$$\dot{m} = \frac{\partial}{\partial t} (\varphi\rho_v) + \nabla \cdot (\varphi\rho_v \mathbf{v}) \quad (3)$$

3) 动量方程

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} (\varphi\rho_v \mathbf{v}_v) + \nabla \cdot (\varphi\rho_v \mathbf{v}_v \mathbf{v}_v) = \\ & - \varphi \cdot \nabla p + \varphi \cdot \rho_v \mathbf{F}_v + \nabla \cdot [\varphi\mu_v (\nabla \mathbf{v}_v + \nabla \mathbf{v}_v^T)] + \dot{m} \cdot \mathbf{v}_v \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} [(1 - \varphi)\rho_l \mathbf{v}_l] + \nabla \cdot [(1 - \varphi)\rho_l \mathbf{v}_l \mathbf{v}_l] = - (1 - \varphi) \cdot \nabla p + (1 - \varphi) \cdot \rho_l \mathbf{F}_l + \\ & \nabla \cdot [(1 - \varphi)\mu_l (\nabla \mathbf{v}_l + \nabla \mathbf{v}_l^T)] + \dot{m} \cdot \mathbf{v}_l \end{aligned} \quad (5)$$

4) 能量方程

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} \left[\varphi \cdot \left(c_{p_v} T + \frac{v_v^2}{2} - \frac{p}{\rho_v} \right) + (1 - \varphi) \cdot \left(c_{p_l} T + \frac{v_l^2}{2} - \frac{p}{\rho_l} \right) \right] + \\ & \nabla \cdot \left[\varphi \cdot \mathbf{v}_v \cdot \left(c_{p_v} T + \frac{v_v^2}{2} \right) + (1 - \varphi) \cdot \mathbf{v}_l \cdot \left(c_{p_l} T + \frac{v_l^2}{2} \right) \right] = \nabla \cdot (k \cdot \nabla T) \end{aligned} \quad (6)$$

式中 ρ 为密度; σ 为气液表面的张力系数; $\dot{m}$ 为气液相变的质量转移; p 为压强; v 为速度; T 为温度; c_p 为比定压热容; φ 为流体中气泡的体积分数; t 为时间; μ 为动力黏度; k 为有效导热系数; 下标 v 和 l 分别表示气泡和流体. 计算中不考虑与外界的热传导及重力, 气泡中的气体为纯氢气.

1.2 弹状气泡运动速度模型

在静置的竖直管道内, Taylor 等^[7]通过大量的实验和理论计算, 对充分发展的弹状流进行了研究, 建立了气泡上升速度模型

$$u = K\sqrt{gD} \quad (7)$$

式中 g 为重力加速度, m/s^2 ; D 为管路内径, m ; K 为与流体性质有关的系数. Moissis 等^[8]在 Taylor 等工作的基础上, 以空气-水为工质对上述模型的系数 K 进行了研究, 他们认为模型适用于静止的垂直管路中气泡对称且边界层压力分布连续的充分发展的弹状流气泡, 气泡的速度为

$$u = 0.35\sqrt{gD} \quad (8)$$

Nicklin 等^[9]对垂直管路内具有一定初速度的流体中产生的弹状流气泡进行了研究, 认为气泡在运动流体中的速度近似等于气泡前方中心线

上流体的最大流速与气泡在静止液体中上升速度之和,并给出了相关的关系式

$$u = CU_1 + U_g \quad (9)$$

式中 U_g 是气泡的漂移速度, m/s ; U_1 为流体的表观速度, m/s ; C 为流体速度对弹状流气泡移动速度的影响系数. 一般来说, 对于湍流而言, $C \approx 1.2$; 而对于管路中充分发展层流而言, $C \approx 2$. 当忽略黏性和表面张力的影响时, U_g 可由如下解析形式给出:

$$U_g = 0.345 \sqrt{\frac{gD(\rho_l - \rho_g)}{\rho_l}} \quad (10)$$

式中 ρ_l 为在某压强和温度下的液相密度, ρ_g 为在某压强和温度下的气相密度. 若 $\rho_l \gg \rho_g$ 时, 上式可简化为

$$U_g = 0.345 \sqrt{gD} \quad (11)$$

Moissis 和 Griffith 等^[8]考虑了弹状流气泡上升时, 气泡间距对稳定运动弹状流气泡后方尾随气泡上升速度的影响, 及管路中气泡上升会产生一定的振荡现象, 对公式(9)进行了修正, 并增加了与气泡间距有关的修正系数 C_1 .

$$u = C_0 U_1 + C_1 U_g \quad (12)$$

$$C_0 = 1.2 - 0.2 \sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_l}} \quad (13)$$

$$C_1 = 1 + A e^{B(L/D)} \quad (14)$$

$$U_g = K \sqrt{\frac{gD(\rho_l - \rho_g)}{\rho_l}} \quad (15)$$

式中 C_0 和 C_1 为速度分布系数; A 和 B 是与 C_1 相关的系数; L 为气泡间距, 即上一个气泡末端到下一个气泡顶端的距离, m .

2 静止液氢中弹状氢气泡运动速度的数值结果与分析

仿真过程中, 采用 VOF(volume of fluid)方法^[10]对气液两相的交界面进行追踪, 并引入连续表面张力模型^[11]对两相间的表面张力进行计算. 主流场计算采用有限容积方法将控制方程离散, 其中扩散项采用中心差分格式, 对流项采用一阶迎风格式, 并采用 PISO(pressure implicit split operator)算法求解 N-S(Navier-Stokes)方程的速度与压力耦合问题. 图 1 给出了竖直管路内静止液氢中完全发展的弹状氢气泡上升时的仿真效果图.

通过仿真研究, 在静止的液氢中, 当弹状流气泡间距较大时, 两连续气泡间相互影响的效果较小, 气泡流速趋于稳定状态. 在管路内径较大的气

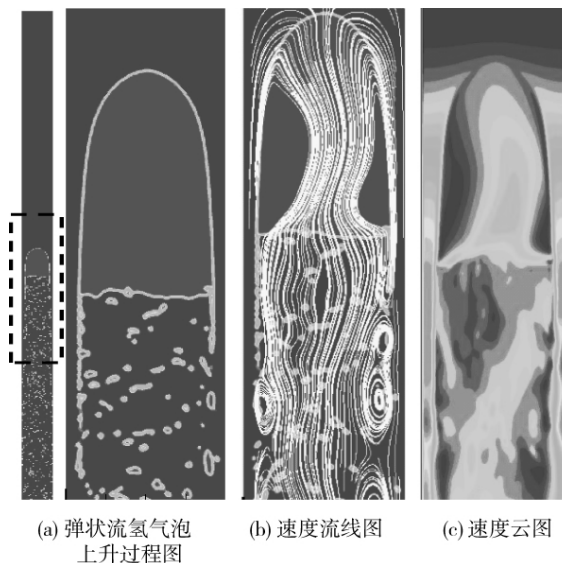


图 1 垂直上升管路内发展中的弹状流氢气泡仿真效果图

Fig. 1 Simulation of the developing Taylor hydrogen bubble in upward vertical pipe

水两相流中, Moissis 的理论模型与实验结果符合得较好, 而当管路内径较小时, 由于雷诺数较低, 小管径中流体的黏性对流体流动产生了较大的影响, 因此, 理论模型与实验结果偏差较大.

图 2 给出了垂直上升管路内充分发展后的弹状流气泡稳定时的速度对比图. 文中弹状气泡的上升速度通过式(16)确定

$$\mu = \frac{x_2 - x_1}{\Delta t} \quad (16)$$

式中 x_1, x_2 为 t_1, t_2 时刻弹状流气泡顶部的位置; Δt 为时间差, $\Delta t = t_2 - t_1$.

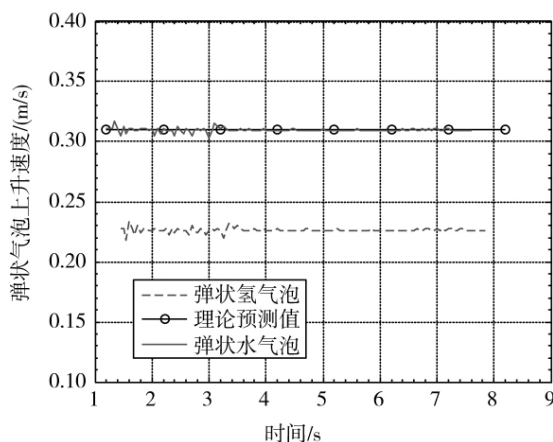


图 2 垂直上升管路内充分发展后的弹状流气泡稳定时的速度对比图

Fig. 2 Rising velocity of developed Taylor bubble in upward vertical slug flow

由图 2 可知,液氢在竖直上升管路中充分发展的弹状泡速度基本在 0.226~0.228 m/s 这个区间内波动,由于存在读数等误差,基本上可以认为气泡匀速上升,上升速度为 0.227 m/s. 对水而言,水在竖直上升管路中充分发展的弹状泡速度基本在 0.308~0.312 m/s 这个区间内波动,而由式(8)求得内径相同的管道内空气-水两相流中弹状气泡上升速度为 0.31 m/s,由此可知,以水为工质的仿真结果与理论预测值符合得较好. 充分发展后的弹状氢气泡的上升速度小于弹状水气泡的上升速度,这是因为低温液体在低温下与水的热力学物性有明显不同,从而 K 的取值不同,求得的弹状气泡上升速度不同.

3 流动液氢中弹状氢气泡运动速度的数值结果与分析

3.1 流动液氢中单个弹状氢气泡运动速度

弹状氢气泡在流动液氢中的速度近似等于气泡前方中心线上液氢的最大流速与气泡在静止液氢中上升速度之和. 通过仿真研究,公式(9)中的速度系数 C 的值与流体的速度有关. 仿真过程中,以液氢为工质,考虑相对于弹状氢气泡的液氢速度的雷诺数从 220 上升到 6380,其系数 C 的值从 1.83 下降到 1.14.

从表 1 可以看出,当竖直上升管内液氢的速度从 0.015 cm/s 上升到 0.445 cm/s 时,对应的雷诺数从 220 上升到 6380,速度系数反而从 1.83 降到 1.14,这说明随着管路内液氢速度的上升,液氢的流动从开始的层流向湍流转变. 文献[12]以水为工质对速度系数进行了研究,从表中可以看出,当水流的速度从 0.87 cm/s 上升到 25.5

表 1 系数 C 随流体速度和雷诺数变化值
Table 1 Coefficient C decreased with the increase of the Reynolds number based on the liquid velocity

流体速度/(cm/s)		Re	C	
水	液氢		水	液氢
0.87	0.015	220	1.86	1.83
4.7	0.082	1800	1.66	1.62
9.35	0.163	2340	1.24	1.20
20.1	0.351	5030	1.17	1.15
25.5	0.445	6380	1.16	1.14

cm/s 时,对应的雷诺数从 220 上升到 6380,速度系数从 1.86 降到 1.16,可以看到本文的结论与文献[12]的预测趋势是相同的.

3.2 流动液氢中尾随弹状氢气泡运动速度

气泡聚合并上升后,弹状流气泡的上升速度主要与气泡流体性质和两个气泡间距离有关. 当两个气泡间隔距离较短时,整个流体处于发展状态,气泡上升过程中会相互影响. 前面的弹状流气泡上升后,会在其后部形成负压,促进气泡过热,从而产生更多的气泡. 此外,弹状流气泡后面的小气泡在其尾部聚合后,会形成一定的绕流区,促使下一个弹状流气泡速度不断增大,直到与前一个弹状流气泡聚并,形成更大的气泡,图 3 给出了垂直上升管路内两连续弹状流氢气泡相互作用模型图及仿真效果图.

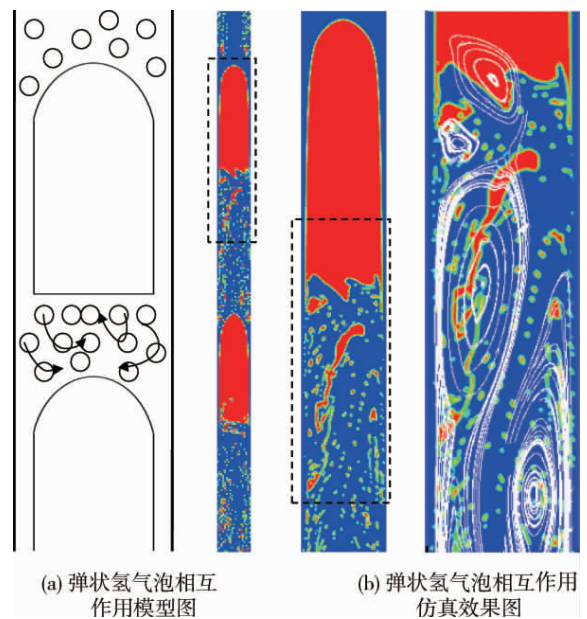


图 3 垂直上升管路内两连续弹状氢气泡相互作用模型图和仿真效果图

Fig. 3 Smulation and the model of two successive Taylor hydrogen bubble in upward vertical pipe

Moissis, Takatoshi^[13], Taitel^[14]、夏国栋^[15]、张亮^[16]都曾经对公式(13)~(15)中的速度系数 K, A 和 B 进行了研究,由于速度系数与实验环境、流体类型以及管路内流体流动时的流型等因素有关,因此得出的系数有所区别,表 2 给出了不同学者所得到的速度分布系数 K, A 和 B 的值.

表 2 中, Moissis, Takatoshi, Taitel 和夏国栋等均在实验的基础上,以水为工质对速度系数

进行了研究,因此 K 值均相同.但由于 Takatoshi 在实验时考虑了液体中出现的振荡现象,夏国栋考虑了发展中的液弹内存在的大量弥散气泡,所以他们得到的其他速度系数略有不同.张亮通过实验的方法,采用液氮为工质,对低温垂直管路中弹状流气泡的上升速度进行了拟合,给出了速度分布系数的值 $K = 0.284, A = 2.02$ 和 $B = -0.623$.

表 2 速度分布系数对比
Table 2 Coefficient of velocity profile

Author'work	K	A	B
Moissis	0.350	8.00	-1.0600
Takatoshi	0.350	2.70	-1.2000
Taitel	0.350	1.00	-0.2875
夏国栋	0.350	4.50	-0.6500
张 亮	0.284	2.02	-0.6230
本 文	0.256	1.98	-0.6010

本文通过仿真的方法,以液氢为工质,对低温垂直管路中稳定运动弹状流气泡后方尾随气泡上升速度进行了拟合,给出了速度分布系数的值 $K = 0.256, A = 1.98$ 和 $B = -0.601$. 为了验证仿真的有效性,本文通过仿真的方法,以水为工质,对速度分布系数进行了研究,仿真结果与 Moissis 给出的结果符合较好,如图 4 所示.

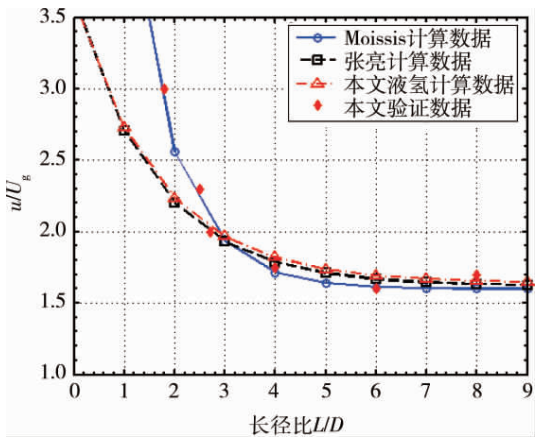


图 4 不同工质的弹状流气泡上升速度对比图
Fig. 4 Rsing velocity of the Taylor bubble under different liquids

图 4 给出了液氢在低温垂直输送管路中弹状流气泡上升速度与 L/D 的速度分布曲线,从图中可以看出弹状流气泡的上升速度随着气泡间距的减小而上升.当气泡间距小于 $5D$ 时,尾随的气泡

因为受到前面气泡的影响,导致弹状流气泡的速度加快.当气泡间距大于 $5D$ 时,气泡速度分布受气泡间距的影响逐渐减少,开始趋于稳定.而当气泡速度在气泡间距大于 $9D$ 以后基本不再相互影响,气泡速度基本不变.

4 结 论

本文对垂直上升弹状流中弹状氢气泡运动速度进行了研究,得出了以下结论:

- 1) 在静置的竖直管道内,充分发展的弹状氢气泡的速度基本在 $0.226 \sim 0.228$ m/s 区间内波动,小于 Moissis 理论模型的计算值 0.31 m/s,这是因为低温液体在低温下与水的热力学物性有明显不同,从而 K 的取值不同,求得的弹状气泡上升速度不同.
- 2) 弹状氢气泡在流动液氢中运动时,Nicklin 给出的速度模型中的系数 C 的值与流体的速度有关.仿真实验中,考虑相对于气泡的流体速度的雷诺数从 220 上升到 6400 ,其系数 C 的值从 1.83 下降到 1.14 .
- 3) 弹状氢气泡在流动液氢中运动时,考虑气泡间距对气泡速度分布的影响,以液氢为工质,对低温垂直管路中稳定运动 Taylor 气泡后方尾随气泡上升速度分布系数进行了拟合与其他学者的工作进行了对比,结果符合较好.
- 4) 弹状流气泡的上升速度随着气泡间距的减小而上升.当气泡间距小于 $5D$ 时,尾随的气泡因为受到前面气泡的影响,上升速度较快;当气泡间距大于 $5D$ 时,气泡速度分布受气泡间距的影响逐渐减少,开始趋于稳定;而当气泡速度在气泡间距大于 $9D$ 以后基本不再相互影响,气泡速度基本不变.

参考文献:

[1] 张华,李满峰,巨永林,等. 倾斜管中低温两相弹状流特性实验研究[J]. 低温技术,2009,38(4):9-16.
ZHANG Hua,LI Manfeng,JU Yonglin,et al. Experimental study on the cryogenic two-phase slug flow characteristic in inclined pipes[J]. Cryogenics,2009,38(4):9-16. (in Chinese)

[2] 李祥东,汪荣顺. 垂直低温推进剂管路中弹状泡形成数值模拟[J]. 哈尔滨工程大学学报,2009,30(2):198-203.
LI Xiangdong,WANG Rongshun. Numerical simulation of slug bubble formation in a vertical cryogenic propellant pipe[J]. Journal of Harbin Engineering University,2009,30(2):198-203. (in Chinese)

[3] Morgan S K,Brady H F. Elimination of the geysering

- effect in missiles[J]. Advance in Cryogenic Engineering, 1962, 7(1): 206-213.
- [4] Murphy D W. An experimental investigation of geysering in vertical tubes[J]. Advance in Cryogenic Engineering, 1965, 10(6): 353-359.
- [5] Burkhalter J E, Richard H S. Investigations of geysering in vertical tubes [J]. Journal of Spacecraft, 1968, 5 (7): 854-857.
- [6] Brennen C E. Cavitation and bubble dynamics[M]. New York: Oxford University, 1995.
- [7] Taylor G I, Davies R M. The mechanics of large bubbles rising through extended liquids and through liquid in tubes [J]. Proc. R. Soc. Lond. Ser. , 1949, 200(10): 375-390.
- [8] Moissis R, Griffith P. Entrance effect in two phase slug flow[J]. Journal of Heat Transfer, 1962, 84(9): 29-39.
- [9] Nicklin D J, Wilkes M A, Davidson J F. Two-phase flow in vertical tubes[J]. Transactions of the Institution of Chemical Engineers, 1962, 40(1): 61-68.
- [10] Hirt C W, Nichols B D. Volume of fluid method for the dynamics of free boundary[J]. Journal of Compute Phys. , 1981, 93(5): 201-225.
- [11] Brackbill J U, Kothe D B, Zemach C. A continuum method for modeling surface tension[J]. J. Compute Phys. , 1992, 100(9): 335-354.
- [12] Polonsky S, Barnea D, Shemer L. Averaged and time-dependent characteristics of the motion of an elongated bubble in a vertical pipe[J]. International Journal of Multi-phase Flow, 1999, 25(3): 795-812.
- [13] Takatoshi T, Mitsuo M. The coalescence mechanism of multiple slug bubbles[J]. Journal of Nuclear Science and Technology, 1999, 36(8): 671-682.
- [14] Taitel Y, Barnea D, Dukler A E. Modeling flow pattern transition for steady upward gas-liquid flow in vertical tubes[J]. General Chemical Engineering Journal, 1980, 26 (3): 345-354.
- [15] **夏国栋, 周芳德, 胡明胜. 垂直管中气液两相弹状流液弹长度分布[J]. 化工学报, 1997, 48(6): 729-735.**
XIA Guodong, ZHOU Fangde, HU Mingsheng. Liquid slug length distribution of gas-liquid two-phase slug flow in a vertical tube[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 1997, 48(6): 729-735. (in Chinese)
- [16] **张亮. 垂直输送管路中低温液体的间歇泉现象研究及自然循环分析[D]. 上海: 上海交通大学, 2004.**
ZHANG Liang. Research of geysering phenomenon and the natural recirculation in the vertical cryogenic transfer pipe[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2004. (in Chinese)