

竖直圆管内泡状流界面参数分布特性

刘国强¹, 孙立成^{1,2}, 阎昌琪¹, 幸莫川¹, 田道贵¹

(1. 哈尔滨工程大学 核安全与仿真技术国防重点学科实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001;

2. 四川大学 水力水电学院, 四川 成都 610065)

摘要:采用双头光纤探针对内径为 50 mm 竖直圆管内空气-水两相泡状流界面参数径向分布特性进行了实验研究。气液两相表观速度变化范围分别为 0.004~0.05 m/s 和 0.071~0.283 m/s。结果表明, 竖直接管内向上泡状流局部界面面积浓度(IAC)、空泡份额及气泡频率径向分布相类似, 即气相流速较低时管道中间很大范围内以上 3 个局部界面参数几乎恒定, 近壁区迅速下降到较低值; 随气相流速的增加, 局部界面参数在管道中心出现峰值。本实验中气泡聚合与破碎现象较少发生, 索特平均直径沿径向近似均匀分布, 且随气液两相流速变化很小。通过气泡横向受力解释了局部界面参数分布的影响机理。

关键词:双头光纤探针; 泡状流; 界面参数分布; 气泡受力

中图分类号: TL334

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2014)07-1176-06

doi: 10.7538/yzk.2014.48.07.1176

Interfacial Parameter Distribution of Bubbly Flow in Vertical Circular Tube

LIU Guo-qiang¹, SUN Li-cheng^{1,2}, YAN Chang-qi¹, XING Dian-chuan¹, TIAN Dao-gui¹

(1. *Fundamental Science on Nuclear Safety and Simulation Technology Laboratory,*

Harbin Engineering University, Harbin 150001, China;

2. College of Water Resource & Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: The experimental study was performed on characteristics of interfacial parameters radial distribution of air-water bubbly flow by using a two-head optical fiber probe in a vertical circular tube with the inner diameter of 50 mm. The gas and liquid superficial velocities cover the ranges of 0.004-0.05 m/s and 0.071-0.283 m/s, respectively. The results show that the local interfacial area concentration (IAC), bubble frequency and void fraction nearly have the same distribution, that is, the three interfacial parameters almost keep constant along radius except in the near wall region where it falls to a low value with a low gas velocity; as the gas velocity increasing, the interfacial parameter has a peak value in the core region of circular tube. In the experiment, few bubble coalescence and breaking up occur, and the bubble Sauter mean diameter distribution in the radial direction is approximately uniform and changes little

收稿日期: 2013-03-12; 修回日期: 2013-04-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51376052, 51076034); 四川大学引进人才启动项目资助(YJ201432)

作者简介: 刘国强(1987—), 男, 内蒙古赤峰人, 硕士研究生, 核能科学与工程专业

with gas and liquid velocities. The lateral bubble force in cross section is considered to explain the local parameters distribution pattern.

Key words: double optical fiber probe; bubbly flow; interfacial parameter distribution; bubbly force

气液两相流动现象广泛存在于油气运输、化学工程、热能动力工程及核电工业等领域。泡状流作为最为典型和基本的一种气液两相流动形式,研究者对其两相流动压降特性等做了大量研究^[1-2]。两相流动系统中,尽管宏观平均参量一致,但局部界面参数却不同,由此可能会导致局部传热传质能力的改变,沸腾通道中,局部参数的改变甚至会带来传热恶化。因此有必要对空泡份额、气泡频率及界面面积浓度等界面参数的局部分布特性进行研究。

界面面积浓度,即单位体积内两相流中分界面的面积大小,决定了相间发生质量、动量和能量传输的能力,同时也是构筑两流体模型的重要参数。获得准确界面面积浓度实验数据、构建界面疏运模型,是两流体模型能否得到更广泛应用的关键;空泡份额反映两相流系统中气相分布特性,也是热工水力设计的重要参数之一。

光纤探针因其响应频率高、精度高,被广泛用于局部参数测量^[3-9]。孙波等^[6]采用光纤探针对于内径 50 mm 和 100 mm 竖直圆管内界面面积浓度径向分布规律进行了研究,但对于内径 50 mm 管内其他界面参数径向分布规律并未进行研究。本文借助自行研制的光纤探针及光学测量系统,对内径为 50 mm 的圆管内泡状流局部界面参数分布特性进行研究。

1 光纤探针及光电转换系统

光纤探针测量法是利用探头端面处于气相和液相不同介质时反射光强度不同来实现探头对气液两相介质的辨别^[7],其测量原理如图 1 所示。光纤探头处于气液两相不同介质时,反射光经光纤信号转换及放大系统处理后,分别转变为高电势和低电势的电压信号。前后探头信号上升起始点的时间差,即为气液界面经过前后探头端面的时间间隔。光纤探头采用 3 层不锈钢毛细管进行保护,既可减小探头对流场的干扰,又能抵抗气泡造成的

震动。光纤耦合器将光源产生的激光等分成 4 束激光,分别作为 4 个探头的光源。同时耦合器将反射光等分为两组,一组进入光电探测器,经多级放大后输出电信号至采集系统,另一组返回光源。

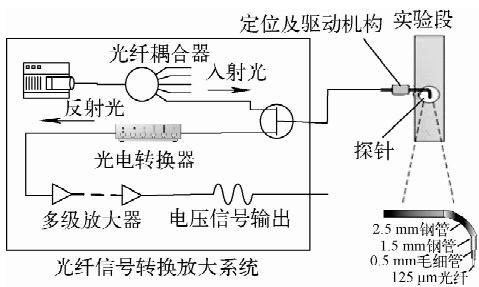


图 1 光纤探针测量原理示意图

Fig. 1 Scheme of optical fiber probe measurement

2 实验回路

实验回路主要由水回路和气回路组成,如图 2 所示。去离子水和空气压头分别由离心泵及空气压缩机提供。入口压力(表压 0.1 MPa)由减压阀控制。混合腔内均布 140 个 $\phi 0.5$ mm 的不锈钢毛细管,确保入口处气泡大小接近,发泡均匀。水流量和气流量分别采用精度为 0.2 级和 1 级精度的质量流量计及玻璃转子流量计测得。距实验段入口 1 200 mm 及 1 700 mm 处安装有精度为 0.04 级的压力传感器,自制双探头光纤探针固定在 $L/D=20$ (L 为探针位置到实验段入口的距离, D 为有机玻璃管径)的位置,以保证光纤探头处于管道内气液两相流体的充分发展段内。气液两相温度由标准温度计测量,水温在回水口取样测量,气温以室温为准。探针距实验段入口 1.2 m,在其定位及驱动机构的作用下沿半径方向从中心线向壁面设置 11 个测点,测点与中心线的距离 r_i ($i=0, \dots, 11$) 与实验段内径 R 的比值分别为 0、0.16、0.32、0.44、0.56、0.68、0.76、0.84、0.88、0.92 和 0.96。液相表观速度为 0.071~0.283 m/s; 气相表观速度为 0~0.05 m/s。

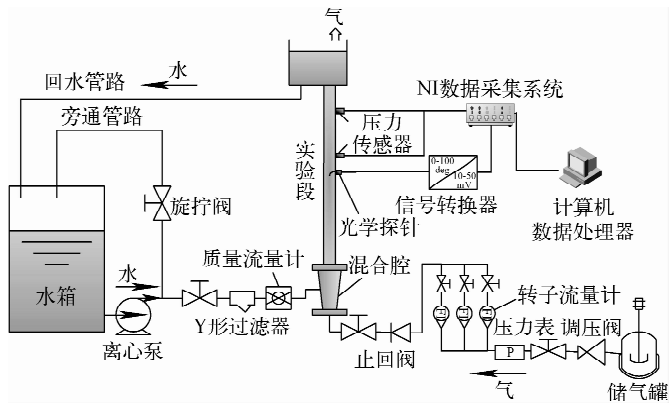


图 2 实验回路简图
Fig.2 Scheme of experimental loop

3 实验数据处理

实验过程中,局部空泡份额通过探针的前端探头信号便可获得,其原理详见文献[6-7]。为验证探针测量结果的准确性,将局部空泡份额按同心圆环面积加权平均后得到的平均空泡份额,与通过压降法计算得到的平均空泡份额进行比较。压降法基本原理如下:压力传感器的位置分别为 $L/D=24$ 和 $L/D=34$ 。本实验条件下,通过压力传感器测得的压差 Δp 主要由两部分构成:

$$\Delta p = \Delta p_g + \Delta p_f \tag{1}$$

由于摩擦压降 Δp_f 小于总压降 Δp 的 1%,可忽略,而重力压降为:

$$\Delta p_g = (\rho_g \alpha + \rho_l (1 - \alpha)) g \Delta h \tag{2}$$

式中: ρ_l 为液体密度; ρ_g 为气体密度; α 为空泡份额; Δh 为两压力传感器之间的距离。

联立式(1)和(2)可得截面平均空泡份额为:

$$\alpha = (\rho_l \Delta p / g h) / (\rho_l - \rho_g) \tag{3}$$

通过计算发现,探针测量值与压降法获得的平均空泡份额的相对误差在 $\pm 10\%$ 以内(图 3),说明用光纤探针测量的空泡份额在实验误差范围内。气泡频率指单位时间内通过局部测点的气泡数,处理时直接统计单位时间内前端探头信号出现高电势的次数。

局部界面面积浓度 a_i 处理采用 Kataoka 等^[10]推荐的方法:

$$a_i = 4 N_i \cdot \frac{1}{v_z} / [1 - \cot 0.5 \alpha_0 \ln(\cos 0.5 \alpha_0) - \tan 0.5 \alpha_0 \ln(\sin 0.5 \alpha_0)] \tag{4}$$

其中: N_i 为前端探头处气泡频率; v_z 为轴向界面速度,由前后探头间距除以界面依次经过前

后探头的时间间隔得到; α_0 为界面速度方向与主流流动方向的最大概率夹角,由主流方向界面速度的均值 $\overline{v_{sz}}$ 和标准偏差 σ_z 求得。

$$\frac{\sin 2\alpha_0}{2\alpha_0} = \frac{1 - \sigma_z^2 / \overline{v_{sz}^2}}{1 + 3\sigma_z^2 / \overline{v_{sz}^2}} \tag{5}$$

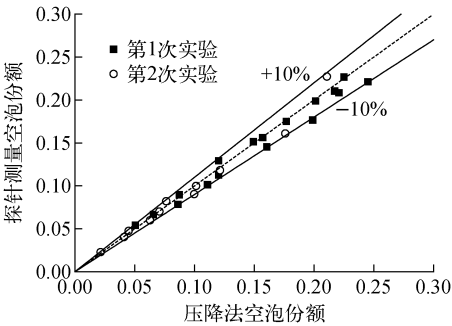


图 3 探针和压降法获得的空泡份额比较
Fig.3 Comparison of void fraction obtained from probe measurement and gravitational pressure drop

根据文献[9,11]对光纤探针测量原理及其误差的分析,发现影响探针准确度的原因主要是两光纤探针头部的轴向距离以及两探头之间的径向距离。其中,确定光纤探针头部的距离主要是为了提高探针获得气泡直径处于 3~9 mm 气泡的有效气泡率,而控制两光纤探针的径向距离主要是为了减少由于气泡横向运动以及气泡曲率对气泡同时通过前后探头的气泡损失率。为了获得准确的实验数据,本实验两光纤探针头部的轴向距离以及两探头之间的径向距离分别固定在 0.9~1.2 mm 及 0.4~

0.8 mm之间。对于空泡份额较低的情况,采用高速摄影的方法能更加准确地获得空泡份额的大小,因此在低气流量下文献[10]对分别采用高速摄影及自研光纤探针两种获得的空泡份额的方法进行了比较,发现两者的实验相对偏差在10%之内。

4 实验结果分析

4.1 局部界面参数径向分布

竖直状态下向上泡状流局部空泡份额、气泡频率和界面面积浓度等局部参数径向分布相类似,如图4所示。气相流速较低时,在管道中间很大范围(0< r_i/R <0.80)内,局部界面参数变化缓慢, r_i/R >0.80时,迅速下降到较低值。当液流速不大于0.142 m/s且气相流速较高时,界面参数径向分布呈明显“核峰型”分布。由图4可见,液相流速越高,界面参数径向分布“壁峰”现象越明显;随气相流速的增加,近壁区界面参数峰值逐步向管道中心方向移动。同时,空泡份额和界面面积浓度径向分布的“壁

峰”现象较气泡频率明显。当气流速较低($j_g \leq 0.03$ m/s)时,随液相流速的增加,局部界面参数径向分布曲线整体逐渐趋于平缓,但在壁面形呈明显的“壁峰型”分布;当气流速较大($j_g \leq 0.05$ m/s)时,随水流速的增加,局部界面参数径向分布逐渐由“核峰型”分布向“壁峰型”分布转变。

4.2 Sauter 平均直径分布

局部气泡索特(Sauter)平均直径 D_{bi} 可由下式计算:

$$D_{bi} = 6\alpha/a_i \tag{6}$$

其中, α 和 a_i 为测点处局部空泡份额和界面面积浓度。

气泡索特平均直径随径向位置及流速的变化示于图5。随着径向位置的改变,气泡索特平均直径未明显改变,即沿着半径方向,气泡大小十分接近。由于本实验测量段在管道内处于气液两相充分发展段,且气液两相流速相对较小,气泡受到的径向剪切力较小,因此实验段中气泡聚合与气泡破碎现象较少发生,探针测

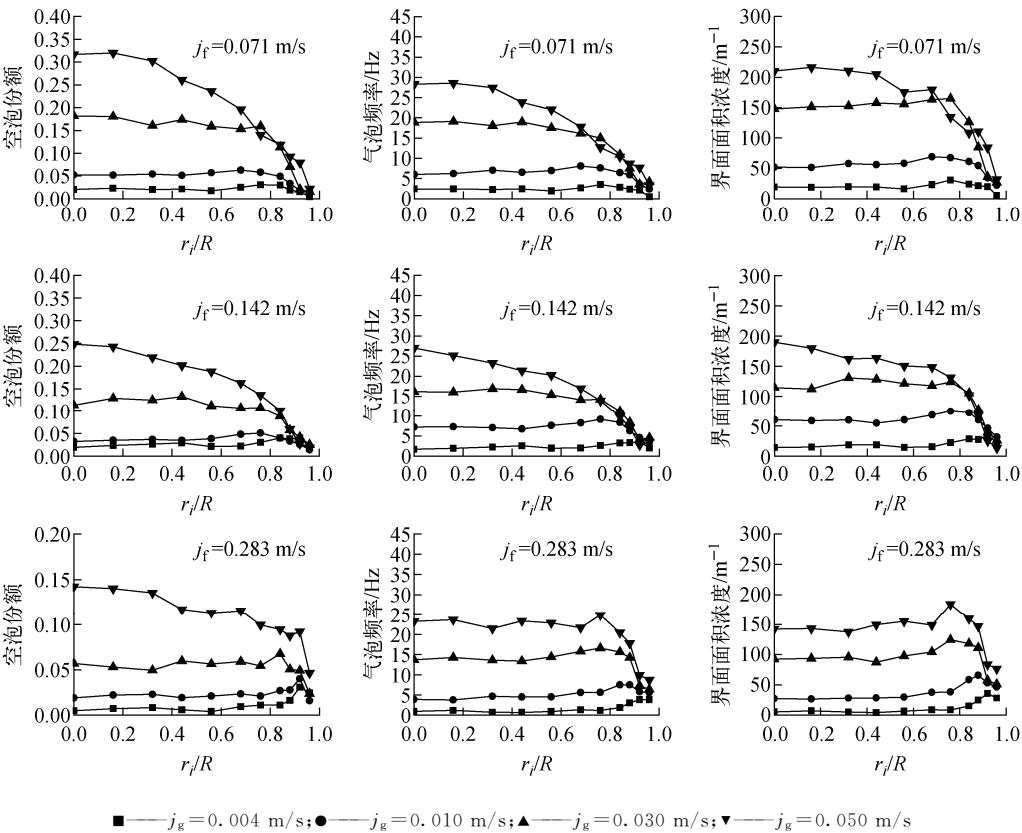


图4 局部界面参数径向分布
Fig. 4 Radial distribution of local parameters

量结果与实验观察相一致。同时由图 5 可知,索特平均直径随气流速及液相流速的变化无明显改变,进一步说明本实验通道中气泡大小主要受入口条件影响。

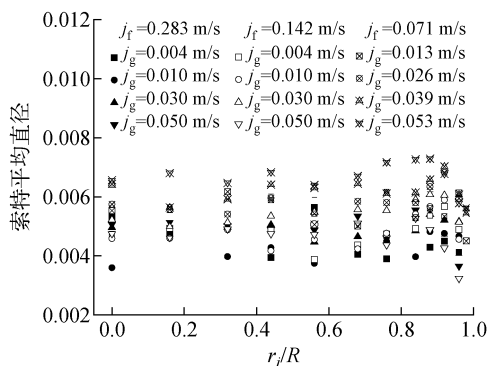


图 5 索特平均直径分布

Fig. 5 Radial distribution
of bubble Sauter mean diameter

4.3 气泡横向受力

文献[12-13]指出,竖直状态下气泡在垂直于主流方向上的运动主要受 3 个力的共同作用:紊流分散力由液相紊流运动造成,主要使气泡均匀分布于液相中;壁面力主要抑制气泡接近管壁,但作用距离很短;横向升力由液相速度梯度不同导致轴向剪切不同而产生,当气泡直径较大时,其方向指向中心,气泡直径较小时指向壁面。本实验中分液相雷诺数在 2 000 ~ 30 000 之间,液相处于紊流状态,受紊流分散力的作用,气泡在通道中心较大范围($0 < r_i/R < 0.80$)内均匀分布,相应的界面参数随径向位置变化平坦。在低气、液流速下,受横向升力的作用,气泡向壁面移动,但壁面力使得气泡不能接近壁面,在 $r_i/R = \pm 0.80$ 附近气泡横向受力达到平衡并大量聚集导致界面参数出现“壁峰”。液相速度越高,紊流分散力及横向升力作用越强,因此相应的“壁峰型”分布越明显。而在高气流速、低液流速下,由于气泡直径较大,受横向升力的作用使大气泡向圆管中心运动,从而形成“核峰”型分布。

5 结论

利用自行研制的双探头光学探针,获得了 $\phi 50$ mm 管内局部空泡份额、气泡频率及界面

面积浓度实验数据及分布规律,得到主要结论如下:

1) 空泡份额、气泡频率及界面面积浓度径向分布相类似。气流量较小($j_g \leq 0.03$ m/s)和液流量较大($j_l \geq 0.283$ m/s)时管道中间较大范围($0 < r_i/R < 0.80$)内界面参数随径向位置变化平缓,且在近壁区呈现“壁峰型”分布;气流量较大且液流量较小时界面参数径向分布呈“核峰型”分布。

2) 局部界面参数径向分布随液流速的增加“壁峰型”分布越发明显;壁峰位置随气流速的增加有逐渐远离壁面的趋势。气泡径向受到的升力、壁面力、紊流分散力是气泡径向分布呈“壁峰”、“核峰”分布规律的主要原因。

3) 沿径向位置气泡索特平均直径无明显变化,通道中气泡聚合与破碎现象较少发生。

参考文献:

- [1] 黄竹青. 基于小波分析的垂直上升管气液两相流型的识别[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(1): 26-29.
HUANG Zhuqing. Wavelet analysis of distinguish flow pattern in vertical upward gas-liquid two-phase flow[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(1): 26-29(in Chinese).
- [2] 洪文鹏, 刘燕, 任静秋. 顺列管束间气液两相流型及压降特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(5): 84-89.
HONG Wenpeng, LIU Yan, REN Jingqiu. Investigation on gas-liquid two-phase flow patterns and pressure drop across an in-line tube bundles [J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(5): 84-89(in Chinese).
- [3] 孙波, 孙立成, 幸奠川, 等. 竖直大圆管内界面面积浓度分布特性[J]. 化工学报, 2012, 63(6): 1 810-1 815.
SUN Bo, SUN Licheng, XING Dianchuan, et al. Distribution profile of interfacial area concentration in vertical and large circular tubes [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering (China), 2012, 63(6): 1 810-1 815(in Chinese).
- [4] SHEN X Z, MISHIMA K, NAKAMURA H. Two-phase distribution in a vertical large diameter pipe[J]. Int J Heat Mass Transfer, 2005, 48(1): 211-225.

- [5] 孙奇,赵华,杨瑞昌. 静止液相中气泡上升过程的分布特性[J]. 化工学报,2003,54(9):1 301-1 305.
- SUN Qi, ZHAO Hua, YANG Ruichang. Rising bubble distribution in stagnant liquid[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering (China), 2003, 54(9): 1 301-1 305(in Chinese).
- [6] SHEN X, MATSUI R, MISHIMA K, et al. Distribution parameter and drift velocity for two-phase flow in large diameter pipe[J]. Nucl Eng Des, 2010, 240(7): 3 991-4 000.
- [7] 唐人虎,陈听宽,罗毓珊,等. 高温高压下用光纤探针测量截面含汽率的实验研究[J]. 化工学报, 2001,52(6):560-563.
- TANG Renhu, CHEN Tingkuan, LUO Yushan, et al. Void fraction measurement by using optical probes at high temperature and high pressure[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering (China), 2001, 52(6): 560-563(in Chinese).
- [8] KLAUS S, ERICH H. An experimental study of the void fraction distribution in adiabatic water-air two-phase flows in an inclined tube[J]. Int J Thermal Sci, 1999, 38(4): 305-314.
- [9] KATAKA I, ISHII M, SERIZAWA A. Local formulation and measurements of interfacial area concentration in two-phase flow[J]. Int J Multiphase Flow, 1986, 12(4): 505-529.
- [10] 孙波,孙立成,田道贵,等. 光纤探针方法测量界面面积浓度实验研究[J]. 原子能科学技术, 2013,47(3):432-436.
- SUN Bo, SUN Licheng, TIAN Daogui, et al. Experimental study of interfacial area concentration by optical fiber probe method[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2013, 47(3): 432-436(in Chinese).
- [11] WU Q, WELTER K, McCREARY D, et al. Theoretical studies on the design criteria of double-sensor probe for the measurement of bubble velocity[J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2001, 12(1): 43-45.
- [12] LUCAS D, KREPPER E, PRASSER H M. Use of models for lift, wall and turbulent dispersion forces acting on bubbles for poly-disperse flows [J]. Chem Eng Sci, 2007, 62(15): 4 146-4 157.
- [13] TOMIYAMA A, TAMAI H, ZUN I, et al. Transverse migration of single bubbles in simple shear flows[J]. Chemical Engineering Science, 2002, 57(10): 1 849-1 858.