

基于光纤光谱的气泡特征参数检测方法研究

刘志成^{1,2}, 王晰晨^{1,2}, 贺超^{1,2}, 姚建楠^{1,2}, 杨柯^{1,2}, 葛峰^{1,2}, 钟年丙^{1*}¹重庆理工大学光纤传感与光电检测重庆市重点实验室, 智能光纤感知技术重庆市高校工程研究中心, 重庆 400054;²重庆理工大学两江国际学院, 重庆 401135

摘要 为了定量检测气液两相流中气泡尺寸(气泡截面直径)、气泡频率、气泡上升速率,提出一种光纤光谱气泡特征参数定量检测方法。首先,采用近红外光纤光谱仪、平凸透镜、多模石英光纤、高速摄像机、气液两相流管道、注射泵等构建了气泡特征参数光学检测系统。然后,建立了光纤光谱定量检测气液两相流中气泡尺寸、频率、速率的理论模型,采用 Zemax 软件仿真分析了光学测量系统的光路传输路径。最后,实验研究了光学测量系统对气泡特征参数定量检测的性能。研究表明,所提出的气液两相流中气泡特征参数检测方法可同时定量检测气泡尺寸、频率和速率,对气泡尺寸、频率、速率检测的最大相对误差分别为 9.8%、8.1% 和 8.7%。

关键词 光谱学; 气液两相流; 气泡尺寸; 气泡频率; 气泡速率; 光纤光谱; 定量检测

中图分类号 TN253

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.2030002

Detection Method of Bubble Characteristic Parameters Based on Optical Fiber Spectroscopy

Liu Zhicheng^{1,2}, Wang Xichen^{1,2}, He Chao^{1,2}, Yao Jiannan^{1,2}, Yang Ke^{1,2}, Ge Feng^{1,2},
Zhong Nianbing^{1*}

¹Chongqing Key Laboratory of Optical Fiber Sensor and Photoelectric Detection, Chongqing Engineering Research Center of Intelligent Optical Fiber Sensing Technology, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China;

²Liangjiang International College, Chongqing University of Technology, Chongqing 401135, China

Abstract To quantitatively detect the bubble size (cross-sectional diameters of bubbles), bubble frequency, and bubble rising velocity in gas-liquid two-phase flow, this study proposes a method for quantitative detection of the bubble characteristic parameters based on optical fiber spectroscopy. First, an optical system for the detection of bubble characteristic parameters is constructed with the near-infrared optical fiber spectrometer, plano-convex lens, multi-mode silica optical fiber, high-speed camera, gas-liquid two-phase flow pipeline, and syringe pump. Second, the theoretical models for quantitative detection of bubble size, frequency, and velocity in gas-liquid two-phase flow are built. Third, Zemax is used to simulate and analyze the optical transmission path in the optical measurement system. Finally, the performance of the optical measurement system in quantitative detection of bubble characteristic parameters is experimentally studied. The results indicate that the bubble size, frequency, and velocity in gas-liquid two-phase flow can be detected quantitatively by the proposed method, and the maximum relative detection errors of them are 9.8%, 8.1%, and 8.7%, respectively.

Key words spectroscopy; gas-liquid two-phase flow; bubble size; bubble frequency; bubble velocity; optical fiber spectroscopy; quantitative detection

收稿日期: 2022-02-14; 修回日期: 2022-03-24; 录用日期: 2022-05-09

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52176178, 51876018)、重庆市高校创新研究群体项目(CXQT21035)、重庆市科委技术创新与应用发展专项(cstc2020jscx-msxmX0097)、重庆市研究生创新项目(CYS21454)

通信作者: *zhongnianbing@163.com

1 引言

气液两相流作为一种典型的多相流,广泛地存在于能源、冶金、生化等领域。气液两相流在线测量技术对于研究气液两相流动及能质传递极其重要,其中气泡作为气液两相流中的重要组成部分,气泡特征参数(气泡尺寸、气泡频率、气泡运动速率)的在线定量测量,是优化控制气液两相流动及能质传递的关键^[1]。因此,在线准确定量检测气液两相流中气泡特征参数成为流体流动、能质传递及在线检测等研究领域共同关注的焦点之一^[2-3]。

当前气液两相流中气泡检测技术主要包括射线衰减法^[4-6]、粒子图像测速法^[7-8]、高速摄影法^[9-10]、探针法^[11-15]等。其中,射线衰减法通常使用 X 射线或 γ 射线进行测量^[4],该方法可适用于多种材质管道内的气泡检测,射线受干扰小,信噪比高,尤其适用于成像^[5],但稳定可靠的射线源难以获得,且成本高昂;射线的高能特征及辐射危害会破坏气液两相流中发生的生物-化学-物理反应,进而使得该方法的实际应用受到极大限制^[6]。粒子图像测速(PIV)方法是将流场中示踪粒子的速度及方向等效为流场相应位置处流体的运动速度及方向,常用空心微珠、荧光粒子等作为示踪粒子,在使用荧光粒子时需要特定波段的激光照射^[7-8]。PIV 方法使用的气体激光器发射波长单一、价格高昂、维护费高、寿命短。高速摄影法基于单台或多台高速摄影机的视觉检测功能来实现流型识别及流动特性的 3D 重建^[9-10],需要收集大量图像信息,不易于直接分析处理,实时性差。探针法使用电学探针^[11-12]和光学探针^[13-14]作为检测工具,其中光学探针是通过连续相对光的吸收及反射不同来区分气相与液相,该方法精确度高,响应速度快,获取信息维度高,但实现流体流型可视化过程复杂^[15]。

综上,射线衰减法、粒子图像测速法破坏性大、实验设备昂贵,但测量结果准确性低、实用性差;高速摄影法可视化效果好,但数据处理过程复杂,难以实现两相流动态参数实时测量;探针法测量精确度高、响应速

度快、获取信息维度高,但难以快速实现两相流的可视化。因此,在现有的检测方法基础上,建立一种新的快速、准确、定量检测气液两相流中气泡特征参数的检测方法十分必要。

为了实现对气液两相流中气泡动态信息(气泡尺寸、频率及运动速率)的在线定量测量,本文建立了一种新的光纤光谱测量方法。采用光纤近红外光谱仪、平凸透镜、多模石英光纤、LED 面阵光源、高速光谱仪、气液两相流管道、注射泵、毛细管等构建了在线定量检测气液两相流中气泡特征参数的光纤光学检测装置。建立了光纤光谱测量气泡尺寸、频率、运动速率 3 个参数的理论模型以及光强时序图处理方法,优化设计了光纤光谱检测系统的光路;实验研究了检测系统对气泡尺寸、频率、运动速率的响应特性。

2 测量原理及仿真

2.1 气泡尺寸的测量原理

在气液两相流中,当气泡传输至光辐射区域时会

$$I_o = (k_1 I_i)^{-\varepsilon d \beta} = \left[\pi (r \sin \alpha)^2 I_i / (\pi r^2) \right]^{-\varepsilon d \beta} = (I_i \sin^2 \alpha)^{-\varepsilon d \beta}, \quad (1)$$

式中: I_i 和 I_o 分别为入射光强和透射光强; $k_1 = 0.0118$ 为气泡对光的透射系数(系统可接收的射入气泡内部的光能量占总入射光能量的系数); r 为气泡等效球体的半径; α 为光束在气液两相界面发生全反射时的入射角; ε 为气泡中气体介质的摩尔吸收系数; β 为气泡中气体介质的浓度; d 为光束在流体中传输的光程。式(1)显示,当 α 和 I_i 一定时,透射光强 I_o 主要受 ε 、 β 和 d 3 个参数影响。

当测量系统中光斑直径大于气泡直径时,气泡在液相流中的运动对光传输的影响是一个动态过程。由图 1 可知,入射光强 I_i 与透射光强 I_o 的关系将修正为

$$\begin{cases} I_{o,1} = I_i, & |L| > r + R \\ I_{o,2} = \frac{(s - s_b) I_i}{s} + \left(\frac{s_a}{s} I_i \right)^{-\varepsilon d \beta}, & r + R \geq |L| \geq R - r \\ I_{o,3} = \frac{s - s_b}{s} I_i + \left(k_1 \frac{s_a}{s} I_i \right)^{-\varepsilon d \beta} = \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right] I_i + \left[k_1 \left(\frac{r}{R} \right)^2 I_i \right]^{-\varepsilon d \beta}, & |L| < R - r \end{cases}, \quad (2)$$

式中: L 为光斑光心与气泡球心的距离; R 为光斑半径; S 为光斑截面积; S_b 为被光束辐射的气泡截面积; S_a 为可接收光束入射的气泡截面积; S_o 为不可接收光束入射的气泡截面积。从式(2)及图 1(d)可以看出:当气泡远离光斑时, $I_{o,1}$ 的强度保持恒定(等于 I_i);当气泡进入或离开光斑时,透射光强 $I_{o,2}$ 受光实际透射面积影响;当气泡完全进入光斑时,透射光强 $I_{o,3}$ 达到最小

值且与气泡截面大小成反比。因此,在实际测量过程中,通过光纤测量系统获得光强信息 $I_{o,3}$,即可计算出气泡直径 $2r$ 。

2.2 气泡频率的测量原理

气泡频率 f 表示一段时间内通过光路的气泡数量与时间(t)的比值,即光强时序图中波谷的数量(N)与时间的比值:

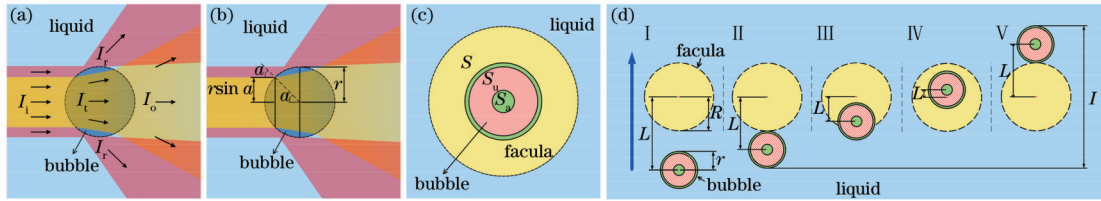


图 1 不同视角下气泡受光照射视图。(a)主视图;(b)俯视图;(c)左视图;(d)气泡通过光路的左视图

Fig. 1 Views of bubbles illuminated by light from different angles. (a) Main view; (b) top view; (c) left view; (d) left view of bubbles pass through optical path

$$f = N/T. \quad (3)$$

2.3 气泡运动速率的测量原理

由图 1(d)可知,半径为 r_j 的气泡从状态 II 到状态 V 的距离为气泡运动距离;运动时间 t_j 为气泡穿过光斑(气泡运动距离)所经历的时间。因此,气泡上升平均速率(v)可以表述为

$$v = \sum_{j=1}^N \frac{2(r_j + R)}{t_j} / N. \quad (4)$$

2.4 光学仿真

为了验证光学检测系统可实现对气液两相流中气泡特征参数的检测,采用 Zemax 软件对液相中无气泡状态下的光传输特性进行仿真,仿真参数和结果见表 1 和图 2。

图 2(a)中,区域 1、4 为光在管壁(PMMA 介质)的

传输光路,区域 2、3 为光在管道液相中的传输光路,区域 5、7 为光在空气中的传输光路,区域 6 为光在平凸透镜中的传输光路。图 2(a)显示,光束从光源传输至焦平面时,由于不同区域具有不同折射率,光在不同介质的分界面发生了折射,从而导致光传输过程中偏离光轴效应加强(光发散角度越来越大)。为了将发散的光束更好地耦合到接收光纤,实现对输入光信号的有效探测,在光路中增加了平凸透镜 6,从而将发散的光束聚焦于焦平面,在不考虑光传输路径中的光反射损耗(如管壁、平凸透镜对光的反射损耗)时,当选取焦平面上光斑半径为 $300 \mu\text{m}$ 和接收光纤纤芯半径为 $300 \mu\text{m}$ 时,将有 7.428% 来自区域 5 的光线被耦合到接收光纤[图 2(b)],表明该系统可以实现对单相液体中传输光谱及光强信息的探测。

表 1 液相中无气泡时的模拟参数

Table 1 Simulation parameters without bubble in liquid phase

Surface	Radius of curvature /mm	Thickness /mm	Refractive index	Abbe number	Semidiameter /mm
1	Infinite	5.00	1.52	41.00	30.00
2	Infinite	17.50	1.33	55.70	30.00
3	Infinite	17.50	1.33	55.70	30.00
4	Infinite	5.00	1.52	41.00	30.00
5	Infinite	260.00	1.00	76.00	30.00
6	30.90	16.29	1.52	64.20	25.40
7	Infinite	60.00	1.00	76.00	25.40

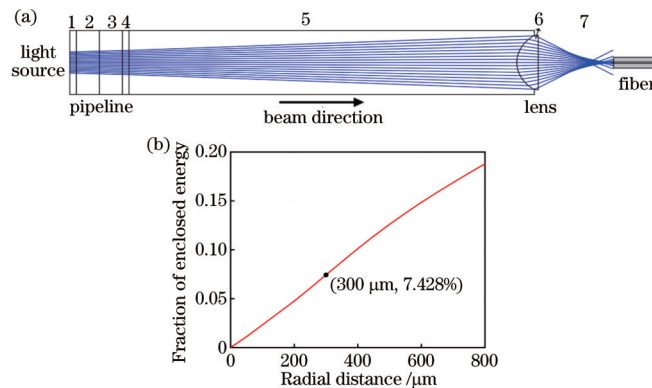


图 2 液相中无气泡时的光路仿真结果。(a)光路模拟图;(b)几何圆能量分布

Fig. 2 Simulation results of optical path without bubbles in liquid phase. (a) Optical path simulation; (b) geometrical circle energy distribution

在单一液相光路仿真的基础上(图2),采用Zemax软件对液相中存在气泡及不同尺寸气泡时的光

传输特性进行仿真分析,仿真参数及结果见表2和图3。

表2 液相中有气泡时的模拟参数
Table 2 Simulation parameters with bubbles in liquid phase

Surface	Radius of curvature /mm	Thickness /mm	Refractive index	Abbe number	Semidiameter /mm
1	Infinite	5.00	1.52	41.00	30.00
2	Infinite	17.50	1.33	55.70	30.00
3	2.00	4.00	1.00	76.00	2.00
4	-2.00	17.50	1.33	55.70	2.00
5	Infinite	5.00	1.52	41.00	30.00
6	Infinite	260.00	1.00	76.00	30.00
7	30.90	16.29	1.52	64.20	25.40
8	Infinite	60.00	1.00	76.00	25.40

图3(a)中,区域1、5区为光在管壁中的传输光路,区域2、4为光在管道液相中的传输光路,区域3为光在气泡(气泡介质为空气)中的传输光路,区域6、8为光在室内空气中的传输光路,区域7为光在平凸透镜中的传输光路。对比图3(a)和图2(a)可以发现,当光传输至气液两相流中时,由于气液两相流中存在气泡[图3(a)],光束在液相中的传输会受到气泡特征参数(气泡大小、频率、上升速率)的影响。由光在气液界面的传输特性及图4(a)可知:一部分光束在气液两相界面上发生反射和折射并射出管道,导致传输光出现损耗;另一部分光穿过气泡向平凸透镜传输,并由透镜聚焦,聚焦后的光束为光探测系统的有效光束。此外,从

图3(b)可以看出:经平凸透镜聚焦后的光束聚焦度较高(光斑半径小);当焦平面上光斑半径为 $10\ \mu\text{m}$ 、接收光纤的纤芯半径为 $10\ \mu\text{m}$ 时,将有100%来自区域6的光束被耦合到接收光纤,表明该系统可以实现对气液两相流中传输光谱及光强信息的探测。同时,由于光在气液相界面的反射和折射效应受气泡特征参数(气泡尺寸、频率、速率)的影响,最终导致传输光谱及光强信息发生变化,当光学系统的其他参数恒定时,通过探测光谱和光强变化即可实现对气泡特征参数的检测。图3(c)显示,随着气泡直径的增大,系统能量衰减度呈线性增加,这说明所构建的光学检测系统对气泡尺寸变化响应灵敏。

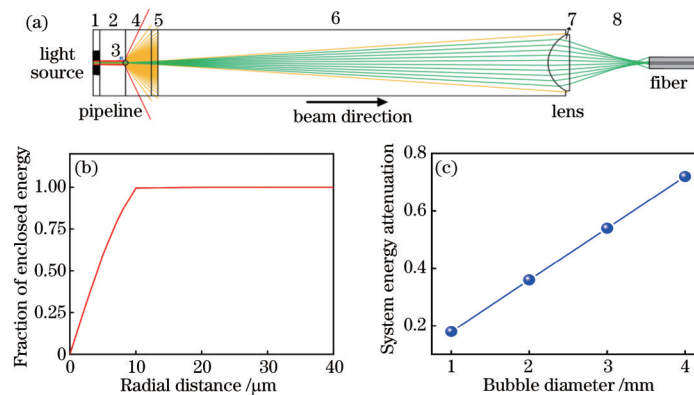


图3 液相中有气泡时的光路仿真结果。(a)光路模拟图;(b)几何圆能量分布;(c)不同气泡尺寸下的系统能量衰减系数

Fig. 3 Simulation results of optical path with bubbles in liquid phase. (a) Light path simulation diagram; (b) geometrical circle energy distribution; (c) system energy attenuation under different bubbles' sizes

图2和图3表明:所构建的光纤光学检测平台可以实现光信息传输;同时,当液相中存在气泡时,光束的传输会受到气泡特征参数的影响,进而影响光纤端面接收的光强信息。因此,通过检测光纤输出端光强的变化可实现对气泡特征参数的测量。

3 实验系统

3.1 实验系统

为了实现对气液两相流中气泡特征参数的定量检测,基于第2节的测量原理及仿真实验结果,采用宽带

光源、光纤光谱仪、平凸透镜、LED面阵光源、多模石英光纤、光纤支架、气液两相流管道、注射泵、毛细管、高速摄像机等构建了光纤光学测量系统,如图4(a)所示,光传输路径如图4(b)所示。

图4(a)中,气液两相流管道($35\ \text{mm} \times 35\ \text{mm} \times 500\ \text{mm}$)采用3 mm厚、可见-近红外光透光率为92%的PMMA材料制成。宽带光源的光谱范围为210~2400 nm(DH-3plus-CAL-EXT,海洋光学,美国)。光谱仪的光谱检测范围为900~1700 nm(Nirquest 512,海洋光学,美国),光学分辨率为6.3 nm(半峰全宽),

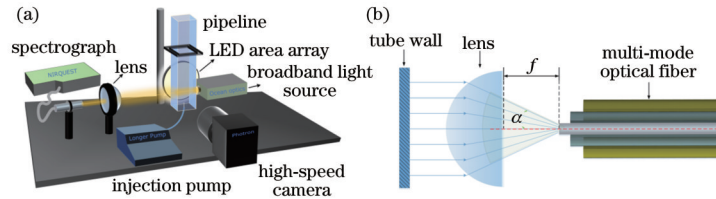


图 4 光学测量系统与光传输路径。(a)测量系统示意图;(b)光传输路径示意图

Fig. 4 Optical measurement system and optical transmission path. (a) Schematic of measuring system; (b) optical transmission path

最低积分时间为 1 ms。平凸透镜的直径为 50.8 mm、焦距 f 为 60 mm、数值孔径为 0.72。宽带光源的光输出端口紧贴管道外管壁,平凸透镜与 DH-3plus-CAL-EXT 光源的间距为 295 mm,光源在管道内形成光斑(有效光斑直径为 4.32 mm),且该光斑中心与毛细管出气孔的垂直距离范围为 5~25 mm。石英光纤的纤芯直径为 600 μm 、数值孔径为 0.429,光纤两端配有 SMA905 接头。光纤纤芯与平凸透镜的光心、宽带光源的中心处于同一水平高度。从图 1(b)可以看出, DH-3plus-CAL-EXT 光源发出的光经过气液两相流管道后传输至平凸透镜,经平凸透镜聚焦后传输至多模石英光纤端面,并耦合进光纤,最终传输到光谱探测仪,从而实现光谱及光强信息的探测。

高速摄像机的最高帧率为 6400 frame/s (FASTCAM Mini AX200 8G color, Photron, 日本)。将 LED 面阵光源(功率为 4 W、光谱范围为 450~460 nm)作为气泡可视化背景光源与高速摄像机分别放置在管道两侧,用于标定气泡特征参数。

3.2 系统运行

为了获得初始光强 (I_0),首先分别对纯气相(空气)和纯液相(184 mL 蒸馏水,水柱高 150 mm)的管道进行实验研究,并使用光谱仪记录 900~1150 nm 波段(由于水和 PMMA 材料对其他波段具有较强吸收)的光谱,获得其平均光强 I_G 、 I_L ,初始光强为 $I_0 =$

$(I_G + I_L)/2$ 。然后,通过设置注射泵的流量以及毛细管的孔径来控制鼓入管道中的气泡大小和频率(流量范围为 10~300 mL/h,毛细管孔径为 200、300、400、500、600 μm),并使用光谱仪记录输出光强 I_0 。实验过程中,液相温度为 $(25 \pm 0.5)^\circ\text{C}$,压强为一个标准大气压 ($1.01 \times 10^5 \text{ Pa}$),光谱扫描积分时间为 1 ms,所有实验重复测量 5 次。

为了对气泡特征参数进行标定,采用高速摄像机(摄像软件为 Photron FASTCAM Viewer 4)对气泡运动过程及状态参数进行拍摄。在对气泡拍摄的过程中摄像机的镜头聚焦于毛细管孔口,并取实际尺寸 10 mm 的垂直刻度、35 mm 的管道固定宽度对像素点大小进行标定。

4 实验结果与讨论

4.1 气泡尺寸测量

为了测试光纤光学系统可实现对气泡尺寸的定量检测,在气体流量为 300 mL/h、测量高度为 5 mm(距离毛细钢管)时,实验研究了所设计的光学系统对不同尺寸(气泡尺寸通过更换孔径为 200、300、400、500、600 μm 的毛细钢管来控制)的空气气泡的响应特性,其中气泡高速摄像机拍摄的结果如图 5(a)所示,检测系统输出光强变化信息如图 5(b)所示,利用式(2)计算得到的气泡尺寸与高速摄像机拍摄数据的对比结果如图 5(c)所示。

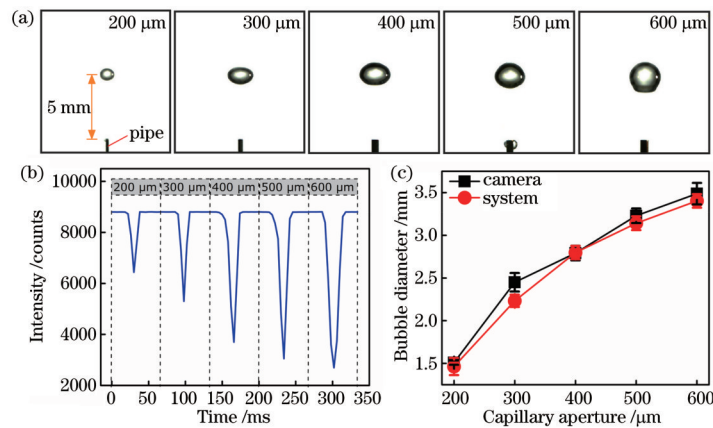


图 5 气泡尺寸测量结果。(a)高速摄像机拍摄图片;(b)检测系统对气泡尺寸的响应特性;(c)气泡直径测量结果

Fig. 5 Bubble size measurement results. (a) Pictures of bubbles by high-speed camera; (b) response of the detection system to bubble size; (c) measurement results of bubble diameter

图 5(a)显示,气泡尺寸随着孔径的增加而增大,当毛细钢管孔径由 200 μm 增大至 600 μm 时,高速摄像机拍摄的气泡尺寸由 1.509 mm 增至 3.488 mm。图 5(b)显示,随着毛细钢管孔径(气泡直径)的增大,系统检测到平均光强信号的波谷值逐渐降低,其原因在于气泡穿过光斑时,光在气液相界面发生反射和折射效应,从而对传输光强产生衰减。图 5(c)显示,在 200~600 μm 毛管孔径范围内,光学系统测量的气泡尺寸与高速摄像机标定值之间的最大相对误差为 9.8%,该误差主要来源于气泡直径按照球体模型进行计算,而实际测量过程中气泡并非均匀球体,从而对气

泡直径的测量结果产生了一定误差。该误差满足工程实际测量需求,因此所构建的光纤光学系统及其检测方法可实现对气液两相流中气泡直径的定量测量。

4.2 气泡频率测量

为了测试光纤光学系统是否可对气泡频率进行定量检测,首先在测量高度为 20 mm 时,实验研究了检测系统对 3 组不同孔径(孔径 A 为 200、400、600 μm)、不同上升频率的气泡(气泡频率通过调整气体流量由 10 mL/h 至 80 mL/h 来控制)的响应特性,结果如图 6(a)所示。然后,采用式(3)计算得到气泡频率,如图 6(b)所示。

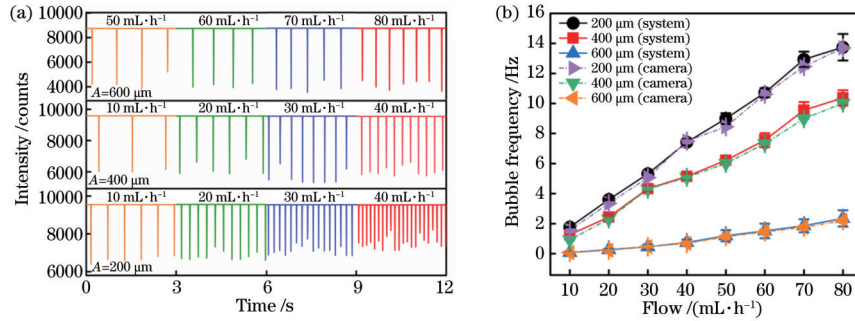


图 6 气泡频率测量结果。(a)检测系统对气泡频率的响应;(b)气泡频率测量结果

Fig. 6 Measurement results of bubble frequency. (a) Response of the system to bubble frequency; (b) measurement results of bubble frequency

图 6(a)分别显示了孔径 A 为 600 μm 、400 μm 、200 μm 时,相同时间内检测系统响应的波谷数量随着气体流量的增大而增加,可以看出光学系统对于气泡运动过程的响应十分灵敏,气泡上升间隔测量结果的最大相对误差小于 5.1%,表明检测系统具有较高的重复性。图 6(b)显示:当气体流量由 10 mL/h 增长至 80 mL/h 时,相同孔径下系统测量的气泡频率随着流量变化呈线性增长;当气体流量不变时,系统测量的气泡频率随着毛细孔径的增大而减小。测量结果与高速摄像机标定值的最大相对误差为 8.1%,表明所构建

的光纤光学系统及其检测方法可实现对气液两相流中气泡频率的定量测量。

4.3 气泡运动速率测量

为了测试所提出的光学系统可实现对气泡上升速度的定量检测,在气体流量为 300 mL/h、毛细钢管孔径为 600 μm 时,实验研究了光学系统对不同上升速率(速率通过调整测量高度来控制,高度变化范围为 5~25 mm)的气泡的响应特性[气泡运动过程拍摄结果如图 7(a)所示],并采用式(4)计算得到气泡运动速率,如图 7(b)所示。

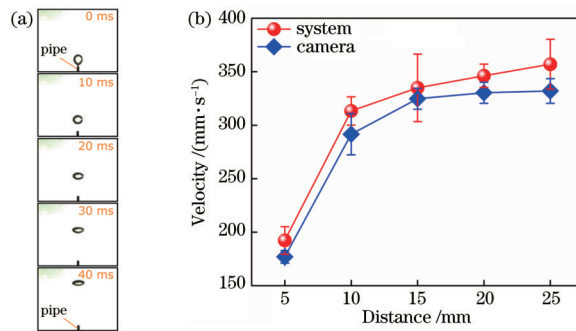


图 7 气泡运动速率测量结果。(a)不同时间下高速摄像机拍摄的照片;(b)气泡运动速率测量结果

Fig. 7 Measurement results of bubble movement velocity. (a) Pictures captured by high-speed camera at different time; (b) measurement results of bubble movement velocity

图 7(a)显示,随着气泡离开孔口时间的延长,气泡在管道中上升的距离逐渐增加,由 0 mm 增加至 14.625 mm。图 7(b)显示,当气泡与孔口的距离由

5 mm 增加至 25 mm 时,测量得到的气泡速率由 192.3 $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 增长至 357 $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 。系统测量结果与高速摄像机标定值的最大相对误差为 8.7%,这是因为

光纤光谱仪的硬件电路及软件处理过程存在时延,导致系统采集数据间隔不均匀(4~7 ms)。该结果表明所构建的光学系统可实现对气液两相流中气泡速率的定量测量。

5 结 论

提出一种在线定量检测气泡尺寸、频率、速率的光纤光谱方法,采用宽带光源、光纤光谱仪、平凸透镜、多模石英光纤、光纤支架、气液两相流管道、注射泵、毛细管、高速摄像机等构建了光纤光学测量系统,建立了气泡尺寸、频率、速率测量理论模型,采用 Zemax 仿真分析了光传输路径,实验研究了测量系统对气液两相流中气泡尺寸、频率、速率的检测性能。研究结果表明,利用检测系统中光纤光谱仪获得的气液两相流中气泡尺寸、频率、速率光强时序信号,并结合理论数学模型实现了对气泡半径、气泡上升频率、气泡运动速率 3 个参数的定量测量,气泡直径、上升频率和运动速率测量的最大相对误差分别为 9.8%、8.1% 和 8.7%。该研究结果可为探索气液两相流能质传递机理及规律提供重要参考,有助于推动气液两相流在线定量光学检测技术的发展。

参 考 文 献

- [1] Jin Z L, Liu Y H, Dong R, et al. Numerical study on gas-liquid two-phase flow and mass transfer in a microchannel[J]. *International Journal of Chemical Reactor Engineering*, 2021, 19(3): 295-308.
- [2] Shi W B, Yang X G, Sommerfeld M, et al. Modelling of mass transfer for gas-liquid two-phase flow in bubble column reactor with a bubble breakage model considering bubble-induced turbulence[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2019, 371: 470-485.
- [3] Shi W B, Yang J, Li G, et al. Computational fluid dynamics-population balance modeling of gas-liquid two-phase flow in bubble column reactors with an improved breakup kernel accounting for bubble shape variations[J]. *Heat Transfer Engineering*, 2020, 41(15/16): 1414-1430.
- [4] Jahangir S, Wagner E C, Mudde R F, et al. Void fraction measurements in partial cavitation regimes by X-ray computed tomography[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2019, 120: 103085.
- [5] 郭静, 冯鹏, 邓露珍, 等. 针孔 X 射线荧光 CT 探测角度优化研究[J]. *光学学报*, 2020, 40(1): 0111017.
Guo J, Feng P, Deng L Z, et al. Optimization of detection angle for pinhole X-ray fluorescence computed tomography[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(1): 0111017.
- [6] Park E J, Choi J I. Resistance and proteomic response of microalgae to ionizing irradiation[J]. *Biotechnology and Bioprocess Engineering*, 2018, 23(6): 704-709.

- [7] Niu P M, Wang D, Wei P K, et al. Liquid flow measurement using phase isolation and an imaging method in horizontal gas-liquid two-phase flow[J]. *Measurement Science and Technology*, 2020, 31(9): 095303.
- [8] 刘志博, 朱志鹏, 何超, 等. 微纳级示踪粒子图像灰度与粒径量化关系研究[J]. *光学学报*, 2020, 40(8): 0811004.
Liu Z B, Zhu Z P, He C, et al. Research on quantitative relationship between image gray value and particle diameter of micro-nano-scale tracer particle[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(8): 0811004.
- [9] Sahovic B, Atmani H, Wiedemann P, et al. A study on the relationship between upstream and downstream conditions in swirling two-phase flow[J]. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2020, 74: 101767.
- [10] Deendarlianto, Rahmandhika A, Widyatama A, et al. Experimental study on the hydrodynamic behavior of gas-liquid air-water two-phase flow near the transition to slug flow in horizontal pipes[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, 130: 187-203.
- [11] He D H, Chen S L, Bai B F. Void fraction measurement of stratified gas-liquid flow based on multi-wire capacitance probe[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2019, 102: 61-73.
- [12] Ko M S, Lee B A, Won W Y, et al. An improved electrical-conductance sensor for void-fraction measurement in a horizontal pipe[J]. *Nuclear Engineering and Technology*, 2015, 47(7): 804-813.
- [13] Ma Y, Lü M Y, Zhang Y R, et al. Influence of probe geometry on the characteristics of optical fiber gas-liquid two-phase flow measurement signals[J]. *Applied Optics*, 2021, 60(6): 1660-1666.
- [14] Yang Q Y, Jin N D, Wang F, et al. Measurement of gas phase distribution using multifiber optical probes in a two-phase flow[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 20(12): 6642-6651.
- [15] Yaqub M W, Marappagounder R, Rusli R, et al. Flow pattern identification and measurement techniques in gas-liquid-liquid three-phase flow: a review[J]. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2020, 76: 101834.
- [16] 李微, 杨克成, 张晓晖, 等. 水中气泡上的体散射函数的模拟与计算[J]. *光学学报*, 2006, 26(5): 647-651.
Li W, Yang K C, Zhang X H, et al. Simulation and computation of bubbles volume scattering function in water[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, 26(5): 647-651.
- [17] 王明军, 王宇航, 陈丹, 等. 二维动态海面-气泡层中蓝绿激光的透射特性[J]. *光学学报*, 2022, 42(2): 0214001.
Wang M J, Wang Y H, Chen D, et al. Transmission characteristics of blue-green laser through two-dimensional dynamic sea surface-bubble layer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(2): 0214001.