

竖直圆管内泡状流空泡份额 径向分布实验研究

幸奠川, 孙立成, 阎昌琪, 田道贵

(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)

摘要: 常温常压下, 采用光学探针测量方法, 对圆管(内径 50 mm)内空气-水两相竖直向上泡状流空泡份额的径向分布特性进行了实验研究。结果表明, 竖直圆管内泡状流空泡份额的径向分布随气液两相表观流速不同而变化。液相流速较高时空泡份额分布呈“壁峰型”, 即中心区域变化平缓, 近壁区出现峰值后迅速降低; 液相静止时, 随气相流速增加, 空泡份额增加速度沿径向向外逐渐减小, 气相流速较大时分布呈“核峰型”, 即空泡份额随径向位置向外呈减小趋势; 液相流速较低时分布呈现出过渡型。探针测量面积加权平均空泡份额与通过重位压降得到的空泡份额的相对偏差小于 10%。

关键词: 光纤探针; 平端面光纤; 竖直管; 空泡份额分布; 泡状流

中图分类号: TL334

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2013)02-0233-05

doi: 10. 7538/yzk. 2013. 47. 02. 0233

Experimental Investigation on Void Fraction Radial Distribution for Bubbly Flow in Vertical Circular Tube

XING Dian-chuan, SUN Li-cheng, YAN Chang-qi, TIAN Dao-gui

(National Key Discipline Laboratory of Nuclear Safety and Simulation Technology,
Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: The radial distribution of air-water two-phase upward bubbly flow in a vertical circular tube (ID 50 mm) was investigated experimentally by using the optical fiber probe under ambient temperature and pressure. The results show that the radial distribution of void fraction changes with different superficial gas and liquid velocities. The void fraction is almost invariable along radius except in the near wall region where it has a peak and then decreases sharply at high superficial liquid velocity which is called “wall peak”. In the case of stagnant liquid, the increasing rate for void fraction becomes slower as the radial position varies from the center to the wall with the increase of superficial gas velocity. When the superficial gas velocity increases, the void fraction decreases radially from the core to the wall location, namely “core peak”. When the liquid velocity is low, the void fraction distribution behaves as the transition pattern.

收稿日期: 2011-08-15; 修回日期: 2012-01-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51076034); 高等学校博士点专项科研基金资助项目(20092304110020)

作者简介: 幸奠川(1986—), 男(土家族), 湖北利川人, 博士研究生, 核能科学与工程专业

The relative deviation of the probe measured area-weighted averaged void fraction against that based on pressure drop is less than 10%.

Key words: optical fiber probe; planar extremity optical fiber; vertical tube; void fraction distribution; bubbly flow

气液两相泡状流广泛存在于工业过程中,空泡份额(或称截面含气率)是决定其流动阻力和传热特性的重要参数之一。压水堆设计及计算中,空泡份额的确定对反应堆内平均冷却剂密度、堆芯中子动力学及反应堆稳定性都有重要影响。因此确定欠热沸腾及两相绝热泡状流条件下的空泡份额特性有十分重要的意义。

国内外学者对空泡份额的研究已开展了多年,并取得了一定的工程应用经验^[1-4]。传统的空泡份额计算模型大多仅针对平均值进行处理,而实际工程应用中,由于热源不对称及气泡运动等造成局部空泡份额分布不均,从而使两相流动局部换热及阻力特性存在差异。目前对局部空泡份额分布的研究主要借助于实验手段。气泡数密度较大时,气泡之间相互遮挡使光学成像及射线衰减等方法出现较大偏差,因此探针测量法被广泛采用。光导纤维探针因其响应频率高,测量精度高,原理简单而被广泛用于局部参数测量^[5-7]。但光纤探针分光及信号转换系统造价较高,圆锥面探针制作工艺复杂,因此本文采用自制的平端面光导纤维探针及相应的光电转换系统,对内径 50 mm 的圆管内泡状流局部空泡份额进行测量,并对其径向分布特性进行研究。

1 光纤探针及光电转换系统

光纤探针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处气液两相介质的辨别^[6-7]。本实验采用单纤光纤探针,即入射光和反射光通过同一根光纤传输,具有对流场干扰小、响应灵敏等特点,但对分光技术要求较高。实验制作的双探头探针,可实现局部空泡份额、气泡通过频率及界面面积浓度的测量。为固定和保护探针,在光纤外安装 4 层不锈钢管。探针头部保护套管直径很小,既可减小对流场的干扰,同时又使得探针具有足够的强度抵抗气泡等造成的震动。探针端面采用专用的光纤切割机

切平,探针实物示于图 1。空泡份额测量时以前端探头的信号为准。

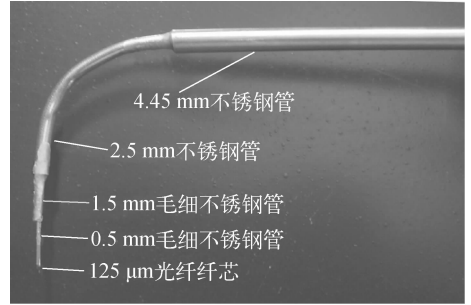


图 1 探针实物图

Fig. 1 Photograph of probe

本课题所用光学探针信号转换放大系统由哈尔滨工程大学光纤传感科学与技术重点实验室制作,其测量原理如图 2 所示。Y 型光纤耦合器将激光等分成 4 组,可分别作为 4 个单纤探针的光源。同时耦合器将反射光等分为 2 组,1 组进入光电探测器(光敏元件)触发产生电信号,经多级放大后输出电压信号至采集系统。当探头端面处于气相介质和液相介质时,对应的输出信号分别为高电位和低电位。光学探针信号转换放大系统最多可同时供 4 路光纤探针使用。

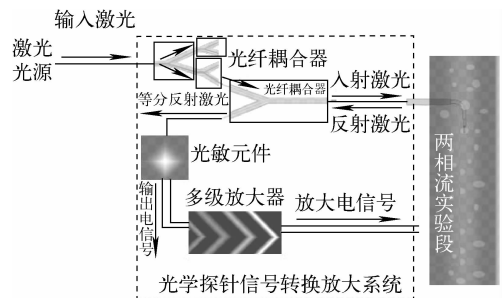


图 2 光纤探针测量原理图

Fig. 2 Schematic diagram of optical fiber probe measurement

2 实验回路简介

实验回路如图 3 所示。实验段采用内径为

50 mm 的透明有机玻璃圆管。实验工质为空气和去离子水,水通过离心泵汲送进入混合腔,而空气经空压机加压后进入混合腔与水混合。气水混合物竖直向上进入实验段。空气流出实验段后释放到大气中,水汇入水箱循环使用。混合腔内均气板上均匀安置 140 个 $\phi 0.5$ mm 的气相导流管,以使水和空气充分混合,保证入口处气泡尺寸接近。水流量通过质量流量计测量(Promass 83,精度为 0.1 级);空气流量较小,采用高精度玻璃转子流量计测量,精度 0.2 级。探针测量轴向位置距实验段入口 $22D$ (D 为实验段内径)。液相温度在回水口取样测量,气相温度以室温为准,均采用标准温度计测量,最大误差为 ± 0.1 $^{\circ}\text{C}$ 。实验参数范围:液相表观流速 j_l 为 $0\sim 0.220$ m/s;气相表观流速 j_g 为 $0.013\sim 0.085$ m/s。所有实验均在标准泡状流下完成。

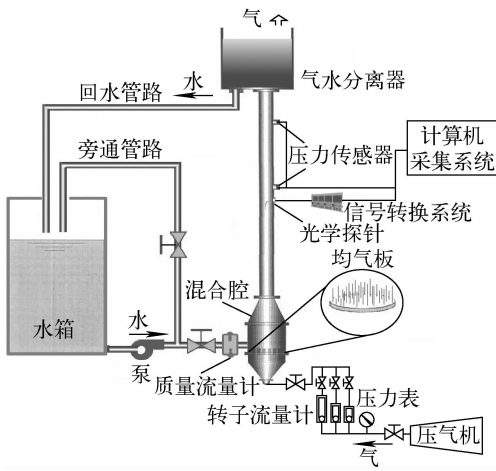


图3 实验回路简图

Fig. 3 Schematic of experimental loop

为验证光纤探针测量的准确性,采用重位压降法计算截面含气率,上下压力传感器距实验段入口分别为 $34D$ 和 $24D$ 。压力传感器的精度为 0.3 级。绝热流动加速压降可忽略,则总压降(Δp)为:

$$\Delta p = \Delta p_g + \Delta p_f \quad (1)$$

其中,摩擦压降(Δp_f)采用奇斯霍姆方法计算^[8],而重位压降(Δp_g)由下式计算:

$$\Delta p_g = [\rho''\alpha + \rho'(1-\alpha)]gH \quad (2)$$

其中: H 为测压孔间距; α 为空泡份额; ρ' 为水

密度; ρ'' 为气密度。

由式(1)、(2)可得出相应的体积平均空泡份额 α 。两相绝热流动中,可近似认为式(2)得到的体积平均空泡份额即为截面平均空泡份额。

3 实验结果及分析

3.1 实验数据处理

探针信号数据处理时采用单阈值法,阈值 V 按以下关系式确定:

$$V = 0.35 \times (\text{最高电势} - \text{基值电势}) + \text{基值电势} \quad (3)$$

其中:基值电势指探针端面与液相接触时的电势;系数 0.35 通过反复尝试与压降法比较得到。

空泡份额测量时,沿着半径方向从中心轴线向壁面设置 11 个测点,离中心轴线的距离 r_i ($i=0, \dots, 10$) 与通道半径 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。

面积加权平均空泡份额 $\langle \alpha \rangle$ 由下式计算:

$$\langle \alpha \rangle = \frac{1}{A} \int_0^A \alpha(r) dA = \frac{1}{R^2} \sum_{i=0}^{10} \alpha_i (r_{i+1}^2 - r_i^2) \quad (4)$$

其中, α_i 为第 i 个径向测点处的局部空泡份额, $i=0$ 时为通道中心。式(4)得到的面积加权平均空泡份额和式(2)得到的空泡份额的比较示于图 4。可看出,探针测得的空泡份额加权平均后和压降法算得的平均空泡份额相对偏差小于 10%,充分证明本实验所采用的平端面探针及光电转换系统准确可靠,阈值选取合理。本实验制作的光纤探针及光电回路对气液两相区分度很高,可用于气液两相

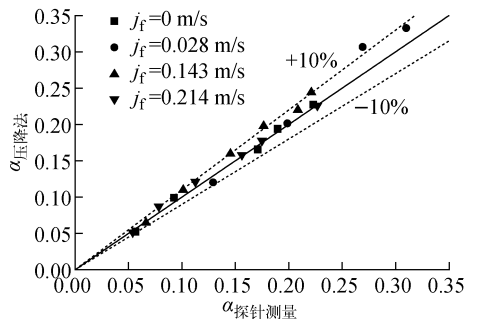


图4 探针测量空泡份额与压降法结果比较

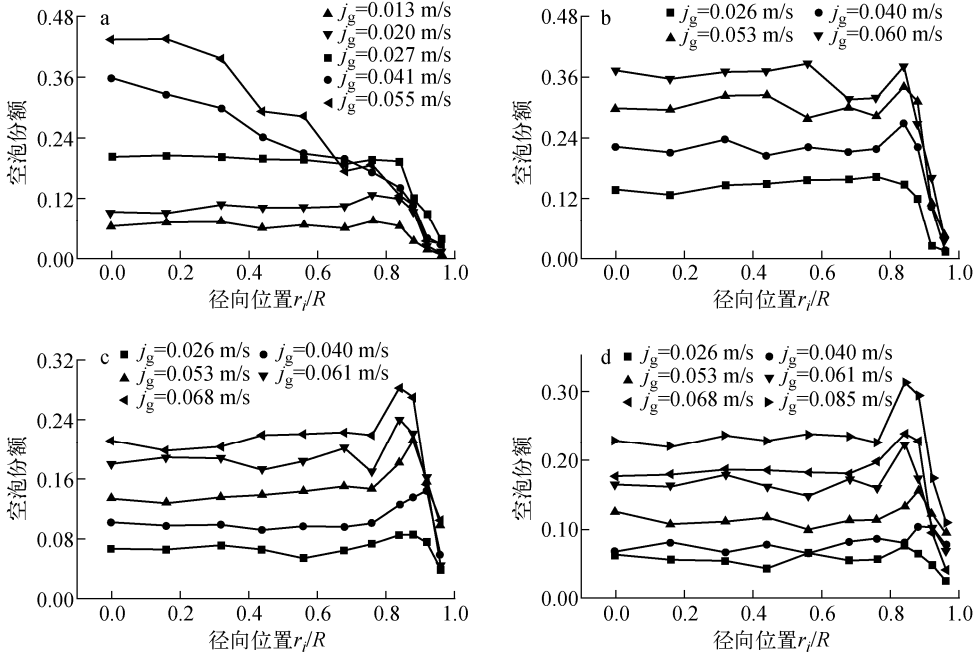
Fig. 4 Comparison of probe measured void fraction with pressure method result

流局部参数的测量。

3.2 空泡份额径向分布

实验测得的不同气液相流速下空泡份额径向分布示于图 5。液相静止时(图 5a),当气相流速很小时管道中心附近($0 < r_i/R < 0.84$)很大范围内空泡份额基本不随半径变化,近壁区($r_i/R > 0.84$)迅速下降到接近于零;增加气相流速,空泡份额增加速率随径向位置的增加而减小;当气相流速达到 0.041 m/s 时,空泡份额呈中间位置较高,随着径向位置的增加逐渐减小的“核峰型”分布。液相流速较高时(图 5c、d),空泡份额在中间很大范围内

($0 < r_i/R < 0.80$)随径向位置变化缓慢,壁面附近($0.80 < r_i/R < 0.90$)出现明显的峰值,然后迅速减小到很低值,分布呈“壁峰型”;且气相流速越大,壁面附近峰值越高。随着气相流速的增大,近壁区峰值有向通道中心移动的趋势,空泡份额径向分布曲线整体向上移动。随着液相流速的增加,空泡份额径向分布“壁峰型”现象越发明显。液相流速较低时,空泡份额在管道中心($0 < r_i/R < 0.84$)有明显变化,近壁区出现小峰值,然后迅速降低到最低值,此时空泡份额径向分布呈“核峰型”向“壁峰型”转变的过渡型分布(图 5b)。



a、b、c、d 对应的液相流速分别为 0、0.028、0.143 和 0.214 m/s

图 5 空泡份额径向分布

Fig. 5 Radial distribution of void fraction

竖直状态下,气泡所受的横向力主要有湍流分散力、横向升力及壁面力^[9-10]。湍流分散力使气泡在截面上趋于均匀;横向升力主要受液相速度梯度的影响,气泡直径较小时指向壁面,气泡直径较大时指向管道中心;壁面力使气泡远离壁面,但影响区域主要在近壁区。液相静止气流量较小时,气泡相互之间碰撞和聚合较少发生。因此,中心区域分布比较平缓,近壁区受壁面力影响,空泡份额急剧下降。增加气流量时,通道中心附近气泡出现聚合,形成中间

高两边低的“核峰型”分布。液相流速较高时,中心区气泡受液相湍流作用,气泡在通道中心较大范围内均匀分布,因此空泡份额中部区域平坦。近壁区液相速度梯度较大,横向升力作用明显。气泡受横向升力的作用向壁面运动,但受壁面力的影响,气泡无法贴近壁面,因此近壁区($0.84 < r_i/R < 0.90$)聚集并形成空泡份额峰值。液相流速较低时,近壁面横向升力,湍流分散力及壁面力的相互作用比较复杂,出现过渡工况。

4 结论

1) 本文自制的单纤平端面光纤探针能有效地识别气相和液相信号, 区分度高, 响应较快, 可用于两相流局部参数的测量。

2) 平端面探头制作简单, 造价低廉。但采用单阈值法处理其信号时经验性较强, 需借助于外部宏观测量参照以确保局部量的准确性和可靠性。

3) 液相流速较大时, 空泡份额沿径向分布呈“壁峰型”。液相静止时, 随着气相流速增大, 空泡份额增加速度随径向位置增加而减小, 气相流速较高时分布呈“核峰型”。液相流速较低时, 分布呈过渡型。

4) 液相强制流动时, 空泡份额“壁峰型”分布现象主要受通道截面上气泡横向受力的影响。

参考文献:

- [1] SCHLEGEL J, HIBIKI T, ISHII M. Development of a comprehensive set of drift-flux constitutive models for pipes of various hydraulic diameters[J]. *Progress in Nuclear Energy*, 2010, 52(7): 666-677.
- [2] SCHLEGEL J P, SAWANT P, PARANJAPES, et al. Void fraction and flow regime in adiabatic upward two-phase flow in large diameter vertical pipes [J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2009, 239(12): 2 864-2 874.
- [3] 周云龙, 孙斌, 赵鹏, 等. 垂直上升管气液两相流截面含气率的理论模型[J]. *水动力学研究与进展: A 辑*, 2003, 18(6): 783-785.
ZHOU Yunlong, SUN Bin, ZHAO Peng, et al. The theoretical model for void fraction of gas-liquid two phase flow in vertical tubes[J]. *Journal of Hydrodynamics: Ser A*, 2003, 18(6): 783-785(in Chinese).
- [4] 孙奇, 赵华, 杨瑞昌, 等. 垂直上升两相流漂移流模型研究[J]. *核动力工程*, 2006, 27(2): 40-44.
SUN Qi, ZHAO Hua, YANG Ruichang, et al. Drift flux model for vertical upward two-phase flow[J]. *Nuclear Power Engineering*, 2006, 27(2): 40-44(in Chinese).
- [5] SHEN X, MISHIMA K, NAKAMURA H. Two-phase phase distribution in a vertical large diameter pipe [J]. *Int J Heat Mass Transfer*, 2005, 48(1): 211-225.
- [6] 郑荣钊, 杨瑞昌, 沈幼庭. 单纤光纤探针测量空泡份额的实验研究[J]. *工程热物理学报*, 1997, 18(1): 99-102.
ZHENG Rongchuan, YANG Ruichang, SHEN Youting. Measurement of void fraction by an advanced single-fiber optical probe[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 1997, 18(1): 99-102(in Chinese).
- [7] 陈听宽. 两相流与传热研究[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2004: 364-371.
- [8] 阎昌琪. 气液两相流[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2009: 40-49.
- [9] 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]. *Chemical Engineering Science*, 2007, 62(15): 4 146-4 157.
- [10] 张立英, 黄青山. 气升式环流反应器的理论研究进展[J]. *过程工程学报*, 2011, 11(1): 162-173.
ZHANG Liying, HUANG Qingshan. Research progress in the modeling theory of airlift loop reactor[J]. *The Chinese Journal of Process Engineering*, 2011, 11(1): 162-173(in Chinese).