

加热上升管内相及相界面密度径向分布特性实验研究

孙 奇¹, 杨瑞昌¹, 赵 华²

(1. 清华大学 热能工程系, 北京 100084; 2. 中国核动力研究设计院 空泡物理和自然循环重点实验室, 四川 成都 610041)

摘 要: 运用双探头光学探针在加热上升管内对蒸汽-水两相流空泡率和相界面密度径向分布特性进行了测量与研究。根据实验结果, 研究了受热工况下相及相界面密度径向分布的基本规律。实验表明: 加热上升管内汽液两相流空泡率在径向上的分布不均匀, 工况不同, 整个直径上空泡率分布可能是近 U 形、鞍形或中心区高于近壁区的近弧形; 界面密度在整个直径上呈近似的 U 形分布。

关键词: 两相流; 空泡率; 界面密度; 光学探针

中图分类号: TK123; O359⁺.1 文献标识码: A

1 引言

在两相流动中, 空泡率与界面密度是决定两相流内部结构的两个基本参数。空泡率代表着两相流动的分相分布情况, 而相界面密度则反映了相间的质量、动量、能量传递情况。

近年来, 随着计算机功能的日渐强大, 已可以提供对两相流更加精细的计算, 两相流模型也由最初的均相流模型发展到目前更为精确的多维两流体模型, 为实现两相流的多维计算, 掌握两相流动中的相及相界面密度的分布特性就显得极为重要。为此, 国外运用光学探针和电阻探针已在此方面进行了一些实验研究^[1~9]。然而, 已有研究多在绝热空气-水系统中进行, 这与大量工业环境下的受热蒸汽-水系统是不同的。对于受热蒸汽-水系统, 由于测量难度较大, 相关研究报道极少。

本实验的主要目的是对加热上升管内汽水两相流空泡率及界面密度的径向分布特性进行研究, 通过双探头光学探针沿管道径向的测量, 得出其径向分布情况, 为更加全面深入地了解受热工况汽水两相流动的真实情况及相关多维模型的发展提供参考。

2 两相流空泡率测量系统

2.1 系统简介

本次实验采用中国核动力研究设计院空泡物理和自然循环重点实验室由法国引进的 RBI 光学探针系统作为测量研究的手段。该探针系统由五部分组成, 分别是光学探针、光电转换模块、数字示波器、信号采集及处理系统、计算机及计算显示软件^[7]。

本次实验前, 作者曾进行了该光学探针系统的准确性检验试验, 试验结果表明探针对气泡信号的响应敏感, 系统可以得出满意的测量结果^[7]。

2.2 空泡率计算

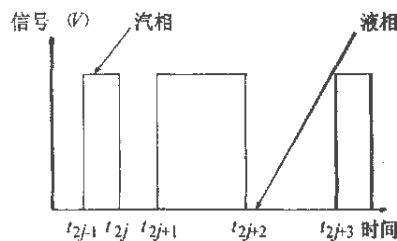


图 1 为转换后的某局部点探针信号, 高低电平分别对应汽相与液相, 则该点处的空泡率为:

$$\alpha(r) = \frac{\sum(t_{2j} - t_{2j-1})}{T}, \quad (1)$$

图 1 局部点探针信号

$j = 1, 2, \dots, N$

其中: r 为径向位置, T 为总采样时间, N 为探测到的气泡数。

2.3 相界面密度计算

相界面密度的计算中, 采用了 Kataoka 等提出的目前应用最为广泛的球形汽泡两相流界面密度模型^[8]:

$$A_i(r) = 4 \cdot f_b \cdot \frac{1}{v_b} \quad (2)$$

收稿日期: 2002-03-11; 修订日期: 2002-06-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(5995460-1)

作者简介: 孙 奇(1975-), 男, 四川大竹人, 清华大学助理研究员, 博士研究生。

其中: f_b 为气泡频率, v_b 为界面速度。

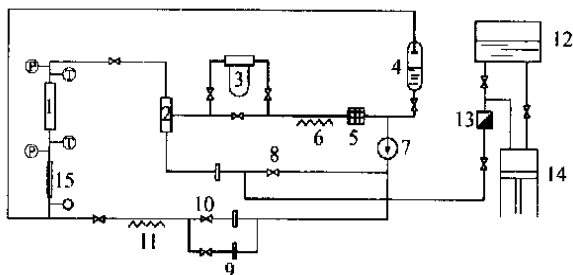
双探头探针测量界面速度(气泡速度)的基本原理是: 已知两探头间距(探头沿流动方向前后排列), 测出同一气泡流经前后探头的延迟时间, 则该气泡瞬时速度可由探头间距与延迟时间之比得到, 通过对多个气泡瞬时速度的统计平均计算, 便可得出探测点的局部界面速度 v_b 。实验测量中采用了互相关法以求解延迟时间, 如 $V_f(t)$ 与 $V_r(t)$ 分别为来自前后探头的信号, 那么采样时间 T 内得出的互相关函数 $F_{v_f, v_r}(\Delta t_m)$ 为:

$$F_{v_f, v_r}(\Delta t_m) = \frac{1}{T} \int_0^T V_f(t - \Delta t_m) V_r(t) dt \quad (3)$$

在零到某一最大值之间选取不同的 Δt_m 值代入上式, 通过反复计算, $F_{v_f, v_r}(\Delta t_m)$ 的最大值所对应的 Δt_m 便是最可几时间延迟。

3 实验装置与实验工况

本实验在空泡物理和自然循环重点实验室热工实验小回路上完成, 图 2 是该实验台架的流程简图。它是一个闭式的高温高压回路, 实验的工作介质为去离子水。从实验段流出的水依次经过汽水混合冷凝器、热交换器、过滤器至屏蔽泵的入口, 再由屏蔽泵送出, 经过预热段进行预加热流回到实验段, 形成一个闭式的循环回路。



- 1- 实验段 2- 汽水混合冷凝器; 3- 热交换器; 4- 稳压器;
- 5- 过滤器 6、11- 加热器; 7- 屏蔽泵; 8、10- 调节阀;
- 9- 孔板; 12- 水箱 13- 止回阀; 14- 柱塞泵; 15- 预热段
- T- 温度 P- 压力

图 2 热工实验小回路流程简图

实验段为一垂直安装的单管试验段, 加热管选用标准管 $\Phi 32 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$, 全长 1.304 m, 其中加热段长 1.0 m, 探测点距加热段入口距离 0.95 m。在加热段进出口布置有 $\Phi 1 \text{ mm}$ 铠装 N 型热偶测量液体温度, 如图 2。为实现探针沿管道径向的精确移动及测量,

设计并制造了探针驱动机构。该机构与实验段刚性连接, 不仅驱动光学探针作一维径向移动, 同时对探针相对于实验段的移动距离进行精确测量, 其测量精度为 0.01 mm。

通过光学探针沿加热管径向的测量, 共计得出 85 个不同工况下近千个局部点的数据。实验工况主要受到探针性能的限制, 最终工况范围如下:

压力	0.13 ~ 2.01 MPa
探测点热平衡含汽率	-5.3% ~ +1.6%
热流密度	306 ~ 775 kW/m ²
质量流密度	266 ~ 814 kg/(m ² ·s)

4 实验结果与分析

4.1 空泡率径向分布特性

实验结果表明上升加热管内两相流空泡率径向分布极不均匀, 不同的系统工况具有不同的径向分布特征, 其中热平衡含汽率对空泡率分布的影响最为显著。

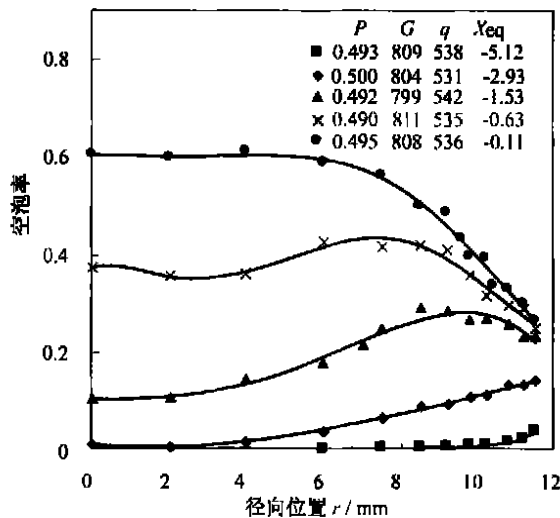


图 3 不同热平衡含汽率空泡率分布

图 3 为典型的不同的热平衡含汽率工况下空泡率径向分布曲线, 其中压力 P 、质量流密度 G 、热流密度 q 以及热平衡含汽率 X_{eq} 的单位分别为 MPa、kg/(m²·s)、kW/m²、%, 径向位置 r (mm) 为局部点到管道中心轴距离, r 等于 0 或 12 分别代表管道中心以及壁面位置处。

由图可见, 低热平衡含汽率工况, 空泡率很小, 由于主流欠热度较高, 加热壁面产生的气泡还未进入管道中心主流区便被冷凝, 因此局部空泡率随 r 的减小不断减小并最终降为零。随着热平衡含汽率的增加,

主流欠热度降低,虽然对加热面产生的汽泡仍然有冷凝作用,但已有一些汽泡进入管道中心区,因此整个截面上空泡率增加且中心区有汽泡存在。当热平衡含汽率进一步升高时,整个截面上空泡率继续增加而中心区尤为显著,最后整个截面上空泡率呈近弧形分布。本文作者认为这主要是因为此时热力学不平衡所起的作用已经很小,空泡率径向分布主要受汽泡动力学作用,由于已有较大汽泡产生,相对于小汽泡而言大汽泡更趋于向管道中心区聚集^[9],使整个截面上空泡率呈近弧形分布。对于近壁区由图可见,随着 r 的增加,低热平衡含汽率工况下空泡率不断上升,高热平衡含汽率工况下空泡率则不断下降。实验过程中发现,在热平衡含汽率不太低而平均空泡率也并不十分高的情况下,局部空泡率将在近壁面某一位置处出现最大值,此时整个截面上空泡率呈近似的鞍形分布。该峰值随压力的升高而更加明显,且随着热平衡含汽率及空泡率的增加该近壁峰有向中心区迁移的趋势。

综上所述可以发现,随着热平衡含汽率的增加,整个截面上空泡率分布从近 U 形(当过冷度较高时中心区空泡率为零)向鞍形、弧形发展。

当过冷度较低以及饱和沸腾工况,随着系统压力的增加汽相密度减小,从实验结果中可以得出一致的规律,即压力升高使空泡率降低,如图 4。

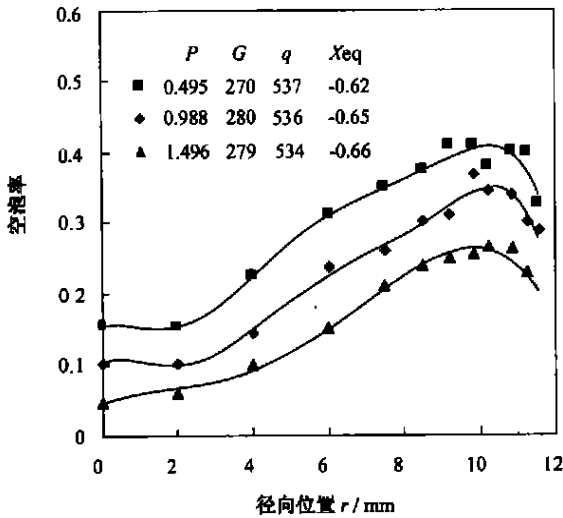


图 4 不同压力空泡率分布

随着热流密度的升高空泡率明显升高,在一些较高热平衡含汽率工况下甚至发现随着热流密度的升高整个截面上空泡率由近似的鞍形分布发展为近弧形,典型的热流密度对空泡率的影响如图 5 所示。

人们一般认为质量流密度对空泡率的影响较小。

然而,实验发现,低过冷沸腾以及饱和沸腾工况下,当工况由 $270 \text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 的低质量流密度上升到 $574 \text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 时,汽泡更趋于向管道中心区迁移,质量流密度对空泡率的影响较大,如图 6。当质量流密度进一步上升至 $811 \text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 时,质量流密度对空泡率的影响很小。因此,可以认为,在高质量流密度工况,其对空泡率的影响在很大程度上可以忽略,而对于一些低质量流密度工况,如自然循环,则必须充分考虑质量流密度对空泡率的影响。通过本实验结果的分析表明,本实验工况范围内,当质量流密度大约低于 $600 \text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 时,其对空泡率的影响较大,反之,对空泡率的影响较小。

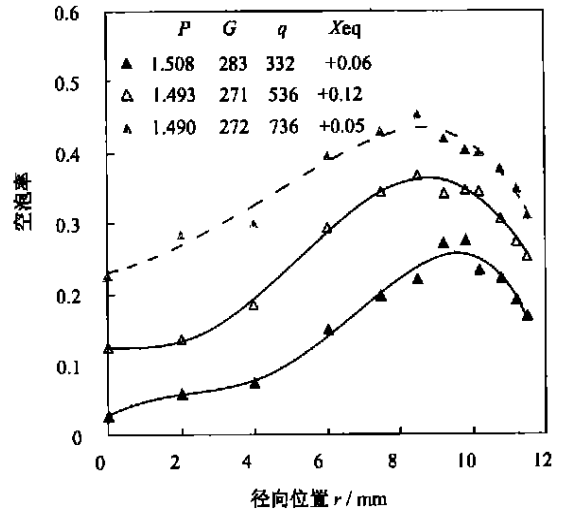


图 5 不同热流密度空泡率分布

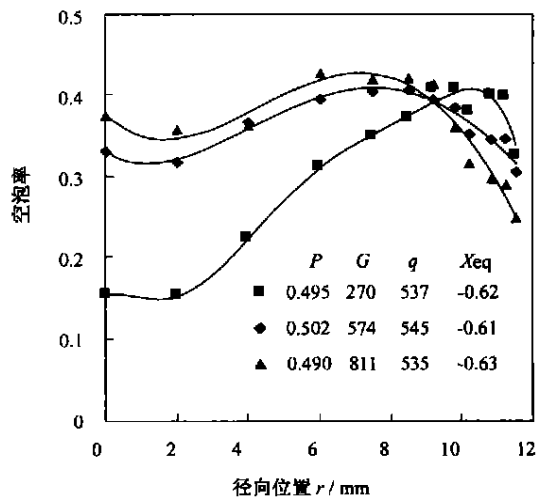


图 6 不同质量流密度空泡率分布

4.2 相界面密度径向分布特性

本实验工况范围内截面上界面密度都呈近似的

U 形分布, 即在近壁面位置处具有最大值, 随着径向位置 r 的减小, 局部界面密度降低并在中心区域出现最小值, 其中近壁区降低最为显著, 中心区其分布则相对较为平坦。

不同热平衡含汽率工况下典型的界面密度径向分布如图 7 所示。随着热平衡含汽率的升高, 产生更多的汽泡, 界面密度普遍上升。由图可见, 随热平衡含汽率的升高界面密度最大最小值之比减小, 即近壁位置处与管道中心区界面密度的差距不断缩小。

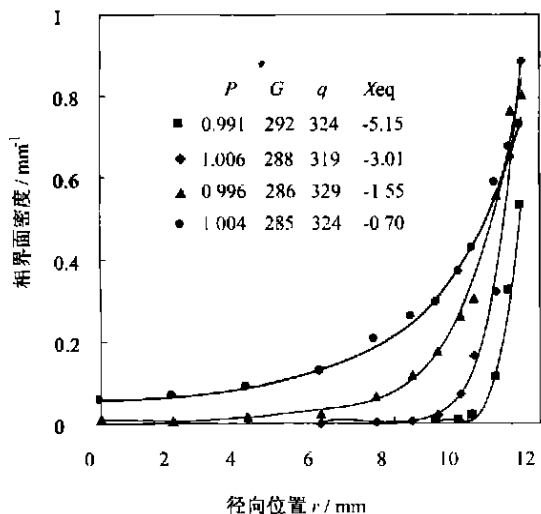


图 7 不同热平衡含汽率界面密度分布

通过图中所示分布曲线可以说明, 相对于中心区, 加热上升管内汽液两相间在近壁区具有非常大的质量、动量、能量交换的界面面积。

5 结论

通过本实验, 可得出以下结论:

(1) 加热上升管内汽液两相流空泡率在径向上的分布不均匀, 工况不同, 整个直径上空泡率分布可能是近 U 形(高过冷沸腾中心区无汽泡)、鞍形或中心区高于近壁区的近弧形。

(2) 热平衡含汽率、压力、热流密度以及质量流密度对局部空泡率都有重要影响: 空泡率随热平衡含汽率的升高而上升, 同时整个直径上其分布曲线从近

U 形向鞍形以及近弧形发展; 在过冷度较低以及饱和沸腾工况, 压力升高, 空泡率降低; 热流密度增加, 空泡率随之增加。本实验工况范围内, 当质量流密度大于 $600 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 左右时, 质量流密度对空泡率的影响很小, 当质量流密度小于 $600 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 左右时, 其对空泡率的影响较大。

(3) 本实验工况范围内, 加热上升管内汽液两相流界面密度在整个直径上呈近似的 U 形分布, 即界面密度随局部点到管道中心轴距离的减小而降低, 其中近壁区降低最为显著, 中心区界面密度分布较平坦。

致谢: 感谢中国核动力研究设计院赵华研究员、李忠朋教授以及蒋序伦副研究员 对本课题所给予的指导和帮助。

参考文献:

- [1] HERRINGE R A, DAVIS M R. Structural development of gas-liquid mixture flows[J]. *J Fluid Mech*, 1976 73(1):97-123.
- [2] LIU T J. Bubble size and entrance length effect on void development in a vertical channel[J]. *Int J Multiphase Flow*, 1993 19(1):, 99-113.
- [3] LIU T J, BANKOFF S G. Structure of air-water bubble flow in a vertical pipe-II void fraction, bubble velocity and bubble size distribution[J]. *Int J Heat Mass transfer*, 1993 36(4):1061-1072.
- [4] KALKACH-HAVARRO S, LAHEY R T JR, DREW D A, et al. Interfacial area density, mean radius and number density measurements in bubbly two-phase flow[J]. *Nucl Engrg Des* 1993, 142(2/3): 341-351.
- [5] 王 洲, 罗 锐, 杨献勇, 等. 双探针测量气液界面的研究[J]. *核科学与工程*, 1996 16(2):120-126.
- [6] REVANKAR S T, ISHII M. Local interfacial area measurement in bubbly flow[J]. *Int J Heat Mass Transfer*, 1992, 35(4): 913-923.
- [7] 孙 奇. 加热上升管内汽水两相流局部特性实验研究[D]. 成都: 中国核动力研究设计院, 2000.
- [8] KATAOKA 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.
- [9] 孙 奇, 吴晓航, 陈 军, 等. 垂直上升管内两相流空泡份额径向分布[J]. *核动力工程*, 2000, 21(5):402-406.

(渠 源 编 辑)

水平直管道中气体—颗粒两相流实验研究 = **An Experimental Study of Gas-granule Two-phase Flows in a Horizontal Straight Pipeline** [刊, 汉] / XUE Yuan, YAO Qiang, ZHANG Jin-cheng (Department of Thermal Energy Engineering, Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(1). — 39~42, 49

The flow field of gas-granule two-phase flows was measured by using a laser technique. During a test with the help of a three-dimensional particle dynamics analyzer measurements were taken of the hourly average speed of glass micro-pearls consisting of 0 - 100 μm granules and a pulse speed distribution with the volume fraction of the granule phase being between 10^{-4} and 10^{-5} . The test results indicate that even for granules with a diameter less than 100 μm their existence in the gas-phase flow field will still give rise to a change in turbulent flow field structure. It has also been observed during the test that the turbulent-flow intensity of gas-granule two-phase flows will increase with the decrease in granule diameter. Furthermore, regarding the distribution of pulsation speed the characteristics of pulsation and random distribution can be observed in the neighborhood of tube wall surfaces. **Key words:** gas-granule two-phase flow, turbulent flow, particle dynamic analyzer

加热上升管内相及相界面密度径向分布特性实验研究 = **An Experimental Study on the Characteristics of Phase and Interphase-density Radial Profile in a Heated Riser Tube** [刊, 汉] / SUN Qi, YANG Rui-chang (Thermal Energy Engineering Department, Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084), ZHAO Hua (National Key Laboratory of Bubble Physics and Natural Circulation under the China National Nuclear Power Research and Design Academy, Chengdu, China, Post Code: 610041) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(1). — 43~46

With the help of a dual-sensor optical probe measured and studied were the radial profile characteristics of both the void fraction of steam-water dual-phase flow and the interphase density in a heated riser tube. On the basis of test results the basic law of the phase and interphase density radial-profile was investigated. Through the investigation it is found that the void fraction of the two-phase flow in the heated riser tube exhibits in the radial direction a non-uniform distribution. Depending on different operating conditions, the void fraction distribution on the whole diameter may assume an approximate U-shape, saddle shape, or an approximate arc shape with a central zone located higher than a near-wall zone. The interphase density along the whole diameter features an approximate U-shaped distribution. **Key words:** two-phase flow, void fraction, interphase density, optical probe

新型不锈钢波纹管性能及强化传热的实验研究 = **An Experimental Study of the Performance of Novel Stainless Steel-made Corrugated Tubes and Their Intensified Heat Transfer** [刊, 汉] / TAN Yu-fei, CHEN Jia-xin (Electromechanical College under the Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150090) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(1). — 47~49

Corrugated tubes made of a new type of stainless steel are multi-layer ones fabricated by the use of a special technique involving a concave wave formation process. In-tube flows are of an equal-diameter flow cluster type and arc-shaped flow cluster type, which can introduce a periodic change of flow speed and pressure. With the production of an intensive perturbation between cold and hot fluids a compound intensified heat exchange is realized. The corrugated tubes were tested for their pressure-bearing capacity and an experimental study of intensified heat exchange law was performed under water-water heat exchange conditions. The intensified heat exchange mechanism of the corrugated tubes was analyzed and an applicable range of optimized dimensions determined for the tubes, thus providing a theoretical basis for the use of corrugated tube-based heat exchangers. **Key words:** corrugated tube made of a new type of stainless steel, experimental study, intensified heat transfer

薄层毛细多孔介质湿区干燥过程相变传热传质常压模型 = **Phase-transformation Heat Transfer and Mass Transfer Constant-pressure Model for the Drying Process of a Thin-layer Capillary Porous Media Wet-region** [刊, 汉] / LU Tao, SHEN Sheng-qiang (Power Engineering Department, Dalian University of Science & Technology,