

气液两相流压力波色散特性实验研究

白博峰¹ 黄飞¹ 王先元²

(1. 西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 陕西 西安 710049; 2. 核动力运行研究所, 湖北 武汉 430074)

摘要 设计了可调频式压力扰动源的气液两相流压力波实验装置, 实验研究了垂直上升管内气液两相流泡状流、弹状流压力波的色散规律。实验结果表明, 对泡状流, 在实验范围内, 压力波的传播速度及其衰减跟扰动频率有关, 随着扰动频率的增加, 波速及其衰减都增加; 工质的流速对压力波的色散特性没有影响。结合数值模拟结果, 验证了泡状流压力波色散特性的临界频率现象, 即高于临界频率, 压力波色散特性消失, 本文分析了相应的物理机制。对弹状流, 压力波同样具有典型的色散特性, 已有研究结果还不能预测其色散规律。

关键词 压力波; 色散; 气液两相流; 波速; 衰减

中图分类号: TK123 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-231X(2005)03-0447-04

MEASUREMENTS ON DISPERSION OF PRESSURE WAVE IN GAS-LIQUID TWO-PHASE FLOW

EAI Bo-Feng¹ HUANG Fei¹ WANG Xian-Yuan²

(1. State Key Lab of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Research Institute of Nuclear Power Operation, Wuhan 430074, China)

Abstract An experimental setup for gas-liquid two-phase flow has been designed, which can adjust the disturbed frequency of the pressure force acting on the piping flow without mass transfer. Experiments on the dispersion characteristics have been performed in vertical upward gas-liquid bubble flow and slug flow through a transparent pipe system under atmospheric pressure. Both pressure wave speed and attenuation were measured under different disturbed frequency with pressure transducers mounted flush to the pipe wall. In the bubbly flow, the results show that both the pressure wave speed and attenuation have close relation with the disturbed frequency. Both the wave speed and the attenuation increase with the disturbed frequency. However, the flow velocity of the two-phase fluid has no effect on the dispersion of pressure wave. Based on the experiment and the numerical simulation in reference [1], a new phenomenon is validated that the dispersion of pressure wave will disappear under the perturbation frequency greater than a critical frequency. And the physical mechanism of this new phenomenon is analyzed in the study. The pressure wave in the slug flow has also the feature of dispersion, but there are still no correlations to predict it.

Key words pressure wave; dispersion; gas-liquid two-phase flow; pressure wave speed; attenuation

1 前 言

气液两相流广泛存在于各种工业过程的管流系统中。压力波作为一种基本两相流流动现象, 其传播过程可以增加界面间的能量和动量的传递, 从而使得两相流的传热、传质及阻力特性发生很大的变化。对其规律的了解可以直接服务于两相流系统的设计与运行、安全分析等, 同时对发展工业多相流测量技术有重要价值。

由于气体的压缩效应和气液两相之间及各相与管壁之间的动量和能量交换, 气液两相流动中压力波传播远比单相中的情况复杂。尽管对气液两相流中压力波传播进行了大量的研究^[1~4], 对泡状流压力波速、弹状流压力波速的大小及含气率、系统压力等的影响规律已基本掌握, 但是对波速及其衰减系数随扰动频率的变化规律, 即色散特性, 至今缺乏充分的认识, 相关研究对压力波的色散现象存在

收稿日期: 2004-11-30; 修订日期: 2005-03-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.50006010); 武器装备部预研基金项目资助 (No.51482080103JW0803); 教育部博士点基金资助 (No.20030698036)

作者简介: 白博峰 (1971-), 男, 河北南皮人, 副教授, 博士, 主要从事多相流热物理及相变传热传质的研究。

与否还有分歧,对弹状流中压力波的色散研究几乎没有。

2 实验系统和数据处理方法

2.1 实验系统与实验段

采用空气和水两相流系统。实验段为内径 40 mm 的有机玻璃管,由混和器、扰动源和测量段几部分组成,其结构和测点布置如图 1。混和器结构如图 2,该混和器通过内径为 0.5 mm 的毛细管均匀的将气体注入从周围流入的水流中,从而形成非常理想的泡状流。扰动装置用于提供给系统连续周期的正弦扰动压力,它通过活塞的来回运动改变扰动窗内的压力,然后由弹性橡皮膜将其传递到两相流体中,因此不改变管内流体混合物的相份额,其结构如图 3。扰动装置的频率可以在 0~314 Hz (角频率)内连续可调。在测量段沿流动方向布置了 5 个压力传感器,间距分别为 0.5 m。在实验段的出口,通过急剧扩大管路直径来消除压力波的反射,以进一步提高所测得的压力信号的准确性。

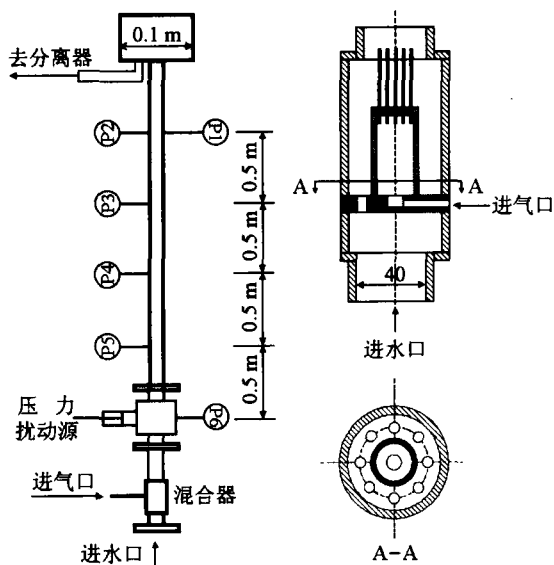


图 1 实验段

图 2 混和器

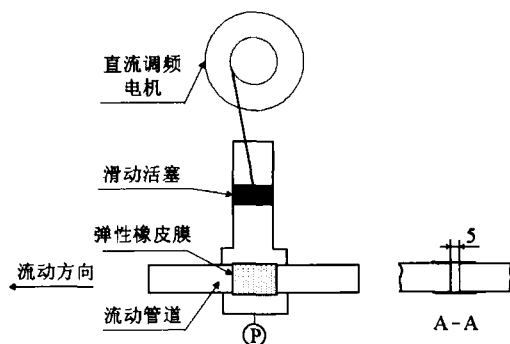


图 3 扰动装置

压力波利用压阻式压力变送器测量,其最大量

程为 0.2 MPa,精度为 0.2%,频率响应 5 kHz。液相的流量由精度达 0.1% 的质量流量计测量,气相的流量由精度达 0.2% 的微调式孔板流量计测量。

2.2 实验数据处理方法

根据波的指数表达式,对于任意位置 x 处压力波信号的振幅可表示为:

$$A_x = A_0 e^{-\eta(x-x_0)} \quad (1)$$

其中, A_0 为初始位置 x_0 处压力波信号的振幅, A_x 是位于 x 处的压力波信号振幅, η 是压力波的衰减系数。由式 (1) 可得压力波的衰减系数为:

$$\eta = -\frac{\ln \frac{A_0}{A_x}}{x - x_0} \quad (2)$$

气液两相流中压力波波速,根据互相关原理将上、下游的压力信号作互相关运算,互相关函数曲线的峰值位置就是所要求取的滞后时间 τ ,再利用安装在管道上两个相同特性传感器在管路轴线方向上的间隔距离 L 除以两传感器信号之间的滞后时间 τ ,即得到压力波传播速度

$$c = \frac{L}{\tau} \quad (3)$$

上式计算得到的速度是波速与流体平均流速之和。由于在本试验的液相及气相流速较低,近似认为上式得到的速度等于压力波速,这样处理产生的最大误差对泡状流 6%,对弹状流为 5%。

通过对 P6 压力信号进行快速傅立叶变化,可以精确获取扰动装置的扰动频率。

3 实验结果与分析

3.1 泡状流压力波

图 4 示出了气液泡状流中压力波速随扰动角频率的变化规律。气液泡状流中的压力波存在明显的色散特性。对于不同的含气率,在扰动角频率较低时波速随扰动角频率的增加快速增加,但扰动角频率增加到较高值以后波速增加的幅度逐渐减小。对含气率为 0.15 的 3 个不同的折算液速 (0.5、1.0、1.5 ms^{-1}),压力波速及其随扰动频率的变化规律相同。

图 5 示出了扰动角频率对压力波衰减系数的影响规律。扰动角频率的增加会加大压力波传播的衰减系数,这是因为扰动角频率的增加,促使了气液界面间动量、能量传递的损失。对含气率 0.125 的 2 个不同的折算液速 (1.0、1.5 ms^{-1}),压力波衰减系数及其随扰动频率的变化规律相同。由于衰减系数是根据压力信号的峰值来计算的,而峰值受流动

随机性的影响很大, 因此实验得到的压力波衰减系数与压力波波速相比而言, 数据点相对较少且比较分散, 同时实验数据得到的误差也会相对大一些。

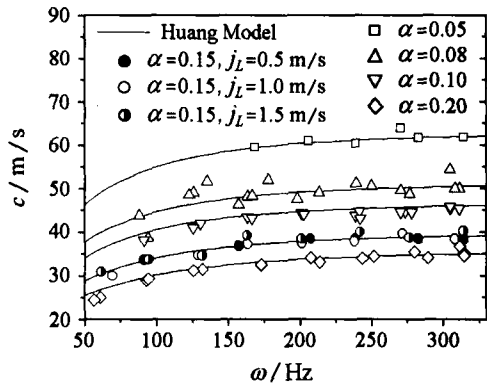


图 4 泡状流压力波速随扰动角频率的变化

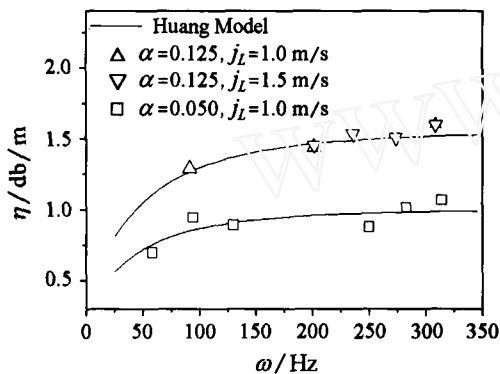


图 5 泡状流压力波衰减系数随扰动角频率的变化

3.2 弹状流压力波

图 6 为扰动角频率对气液弹状流中压力波速的影响规律。可见弹状流压力波的传播同样具有明显的色散特性。对不同的含气率, 随着扰动角频率的增加, 压力波波速均会不断增大。此外, 弹状流压力波速随含气率的增加而增加, 这与泡状流的变化规律相反。

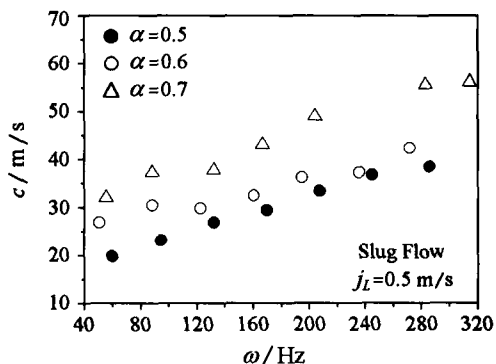


图 6 弹状流压力波速随扰动角频率的变化

图 7 则示出了压力波衰减系数随扰动角频率的变化规律。随着角频率的增加, 压力波传播的衰减

系数不断加大。但含气率为 0.7 时, 压力波的衰减增加不是很明显, 而且其值相对于含气率为 0.5 和 0.6 时要小得多。这是因为, 在液弹中, 压力波的衰减系数会随着含气率的增加而逐渐减小, 最终会由于液弹中含气率的恒定而趋于稳定; 而在气弹中压力波的衰减系数会因为气弹中含液率很低而基本不变。

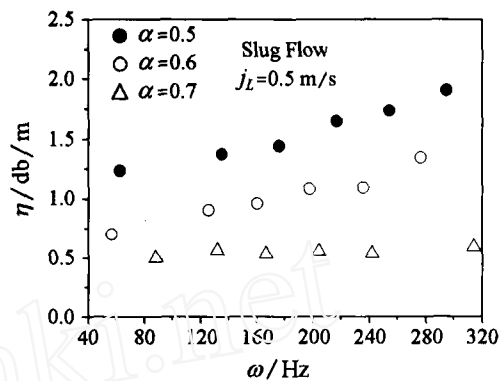


图 7 弹状流压力波衰减系数随扰动角频率的变化

3.3 实验结果与模型计算值的比较

目前, 关于压力波色散特性的实验预测关联式尚无报道。本文作者曾利用整体两流体模型, 根据小扰动原理对气液两相泡状流中压力波的传播进行了模化计算分析^[1]。气液泡状流中压力波速计算值和实验值的最大误差为 10%; 压力波衰减系数计算值和实验值的最大误差为 20%。图 8 示出了压力波色散特性的数值模拟结果。在低频范围内, 压力波速和衰减随着扰动角频率的增加逐渐加大; 但是当扰动角频率增加到临界值以后, 波速和衰减趋于某一恒定的值, 波的色散现象基本不再发生。结合图 4, 临界扰动角频率取 300 Hz。这是因为在低频压力扰动下, 相间有足够的时间进行质量、动量和能量的交换, 相间接近机械及热力学平衡状态, 使气液混和物能达到充分的有序, 因而得到了较低的压力波波速和衰减系数。随着扰动角频率的增加, 压力波的作用使相间没有充裕的时间达到平衡状态, 相间作用也会因此而变得越来越剧烈, 从而导致压力波波速的不断增大和衰减的增强。在高频扰动下, 相间根本就来不及质量、动量和能量的交换, 气液混合物基本不能达到有序状态, 因而压力波波速逐渐趋于稳定, 衰减系数也渐渐稳定, 压力波的色散现象基本消失。

气液两相弹状流中压力波的传播, Legius^[2] 将 Korolev^[6] 的弹状流模型结合 Nguyen^[7] 的气液两相流压力波模型得到了其压力波传播的速度为:

$$c = c_N \frac{L}{L + L_{Tb} + L_{Ls}} = c_N \frac{1}{1 + \frac{1}{N}} \quad (4)$$

其中, c 是弹状流中压力波的波速, L_{Ls} 是液弹的长度, L_{Tb} 是 Taylor 气泡的长度, L 是管路的长度, N 是管路上弹单元的数量, c_N 是根据 Nguyen 模型得到的压力波波速:

$$c_N = \frac{1}{(1-\alpha)\sqrt{\frac{1-\alpha}{c_L^2} + \frac{\alpha\rho_L}{\rho_G c_G^2}} + \alpha\sqrt{\frac{\alpha}{c_G^2} + \frac{(1-\alpha)\rho_G}{\rho_L c_L^2}}} \quad (5)$$

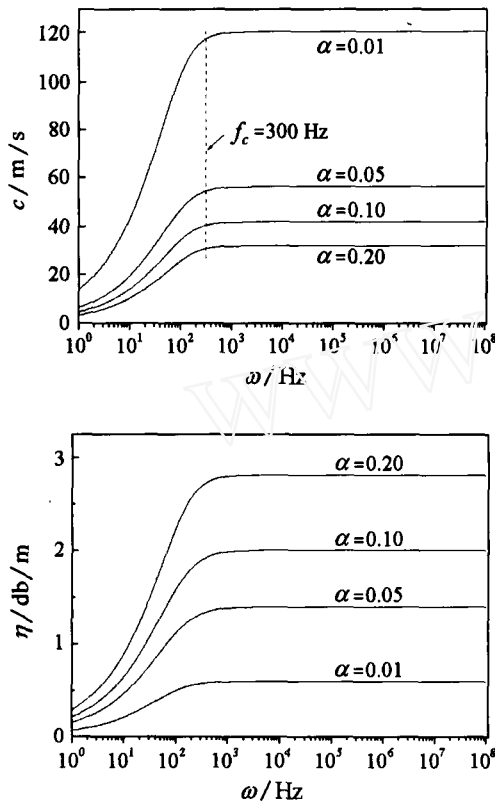


图 8 扰动频率对压力波色散特性的数值预测结果 (管径 40 mm, 系统压力 0.11 MPa)

图 9 是本文实验数据与上述 Korolev-Nguyen 模型 (N 取为 5) 的比较结果, $\omega = 126$ Hz 的压力波速

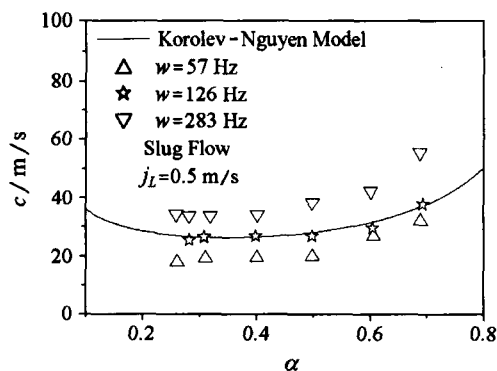


图 9 气液弹状流中压力波传播的实验值与 Korolev-Nguyen 模型计算值的比较

试验结果与 Korolev-Nguyen 模型基本重合, 但计算式对其它扰动频率的试验结果有明显的系统预测误差。说明该模型可以预测压力波速随含气率的变化趋势, 但不能体现出压力波传播的色散特性。

4 结 论

本文利用可调频式压力扰动源试验技术, 实验研究了内径 0.04 m 垂直上升管内气液两相流泡状流、弹状流压力波的色散规律, 并结合数值模拟及文献结果对试验结果进行了分析。得到以下结论:

(1) 泡状流和弹状流压力波的传播都具有色散性, 即增加扰动频率会提高压力波波速及其衰减系数。

(2) 对泡状流压力波, 存在一个临界频率 f_c , 当扰动频率小于 f_c , 其色散现象消失, 即压力波的传播特性与外部扰动频率无关。

(3) 流速对泡状流压力波的色散特性没影响。

(4) 在试验含气率参数范围内 (0.25~0.70), 弹状流压力波波速及其衰减系数受含气率的影响规律与泡状流压力波相反, 即弹状流压力波波速随含气率的增加而增加。

(5) 文献 [1] 提出的数理模型可以准确预测泡状流压力波的色散特性, 而对弹状流压力波的传播, 目前缺乏预测其色散规律的方法或关联式。

参 考 文 献

- [1] Huang F, Bai B F, Guo L J. A Mathematical Model and Numerical simulation of Pressure Wave in Horizontal Gas-Liquid Bubbly Flow. Progress in Natural Science, 2004, 14(4): 344-349
- [2] H J W M Legius, H E A Van Den A Ker, T Narumo. Measurements on Wave Propagation and Bubble and Slug Velocities in Concurrent Upward Two-Phase Flow. Experimental Thermal and Fluid Science 1997, 15: 267-278
- [3] L Ainouche, C Alquie. Application of the Pressure Wave Propagation Method for Adhesion Defects Detection and Quantification in Bilayer Structures. J. Applied Physics, 1999, 86(2): 1156-1166
- [4] H Wang, H Priestman, G H Beck, S B M. Pressure Wave Attenuation in an Air Pipe Flow. Mechanical Engineering Science, Part C, 2000, 214(4): 619-632
- [5] 郭烈锦. 两相与多相流动力学. 西安: 西安交通大学出版社, 2002. 252
- [6] A V Korolev. Dynamics of Low-Velocity Two-Phase Flows. Power Eng., 1989, 27(5): 101-106
- [7] D L Nguyen. Sonic Velocity in Two-Phase Systems. Int. J. Multiphase Flow, 1976, 2: 453-464