

# 小长径比垂直管气液两相流动特性分析

王海琴<sup>1</sup> 何利民<sup>1</sup> 李志彪<sup>2</sup>

( 1. 中国石油大学储运与建筑工程学院, 山东 东营 257061; 2. 中国科学院力学研究所, 北京 100080 )

**摘 要** 实验观察了小长径比垂直上流管内流型及特点, 并对管入口处的压力波动特性和系统的压差波动特性进行了试验研究。结果表明: 小长径比 ( $L/D$ ) 垂直管内流型表现为泡状流、塞状流、乳沫状流、环状流和液束环状流; 分别增加管线中的气量、液量, 或者同时增加气液流量, 均会造成垂直管入口处压力波动的均值和最大压力的增加; 压力信号的概率密度 (PDF) 大部分呈双峰分布, 也存在单峰和多峰分布; 差压信号的概率密度符合正态分布, 其功率谱密度同压力信号相比具有频率波动范围宽、幅值小的特点。

**关键词** 垂直管; 流型; 压力波动; 压差波动; 试验研究

中图分类号: O359 文献标识码: A 文章编号: 0253-231X(2006)Suppl.1-0189-04

## CHARACTERISTICS FOR GAS-LIQUID TWO-PHASE FLOW IN A UPWARD VERTICAL PIPE WITH SMALL LENGTH-DIAMETER RATIO

WANG Hai-Qin<sup>1</sup> HE Li-Min<sup>1</sup> LI Zhi-Biao<sup>2</sup>

(1. College of Storage & Transportation & Architecture Engineering, China University of Petroleum, Dongying 257061, China;  
2. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Science, Beijing 100080, China)

**Abstract** Many experiments about Characteristics for air/water two-phase Flow have been carried in 2.2m long, 50 mm i.d. vertical stainless steel pipe. Flow patterns are obtained through watching. The results also show that the increase of gas flowrate or liquid flowrate will cause the increase of mean value and maximal value of pressure and differential pressure. Most distributions of probability density function(PDF) for pressure signal show dual-peak distributions. However, there are some single-peak and multi-peak distributions. Distributions of probability density function (PDF) for differential pressure signal obey normal distributions. By contrast with pressure signals, distributions of power spectral density (PSD) for differential pressure signal show wider frequency range and lower amplitude.

**Key words** vertical pipe; flow pattern; pressure fluctuation; differential pressure fluctuation; experimental investigation

### 1 前 言

小长径比 ( $L/D < 100$ ) 圆管是核工业、锅炉工业、化学工业以及石油工业中常见的一种管道结构。近几十年来, 人们对垂直管内气液流动特性进行了广泛的研究<sup>[1~4]</sup>, 但多集中于大长径比管道。现有的气液流动动力模型<sup>[5]</sup>多是在管线直径较小 ( $D < 50$  mm)、长径比较大 ( $L/D > 100$ ) 的条件下推导出来的, 不适用于小长径比管道。小长径比垂直管内气液流动特性的深入研究, 对于许多工程系统的优化设计及安全运行具有非常重要的意义。

### 2 试验系统

整个试验系统分为三部分, 即入口之后的微下

倾管段、垂直管段和出口前的水平管段。主要实验管段为长 2.2 m、内径 0.05 m 的垂直不锈钢管线。实验介质为空气和水。试验系统上布置了 11 台 Keller PA25e 压力变送器 (频响为 5 kHz)。数据采集系统利用 National Instrument 公司的 PCI-6071E 高速采集卡采集压力和流量计信号 (单通道采集频率  $1.25 \times 10^6$  Hz), 采用 Soltron-1H 采集板测量实验过程中空气、水及其混合物的温度。

### 3 流型及特点

试验观察到的气液流型如图 1 所示。

(1) 泡状流

液相为连续相, 其中带有散布的小气泡。如图

收稿日期: 2006-03-03; 修订日期: 2006-06-07

作者简介: 王海琴 (1969-), 女 (满族), 辽宁兴城人, 讲师, 在职博士研究生, 主要从事多相流与油气田地面工程的教学和研究工作。

1(a) 所示。

#### (2) 弹状流 (或称塞状流)

弹状流是由一系列气弹组成, 气弹端部呈半球状而尾部是平的。在两气弹之间的液相中夹带有小气泡。如图 1(b) 所示。

#### (3) 乳沫状流

随气流速度增加, 弹状流的大气泡破裂, 气液界面很不规则, 没有结构特征。液体在管内既有向上流动, 又有向下流动, 同时伴随有激烈的震荡, 这是一种过渡的不稳定流型, 如图 1(c) 所示。

#### (4) 环状流

液相沿管壁呈膜状流动, 气相在管中心流动。实际上纯环状流工况的参数范围很窄, 通常呈环状弥散流状态, 如图 1(d) 所示。

#### (5) 液束环状流

中心部分气核从液膜带走的液滴在气核内形成不规则的长纤维形状, 如图 1(e) 所示。

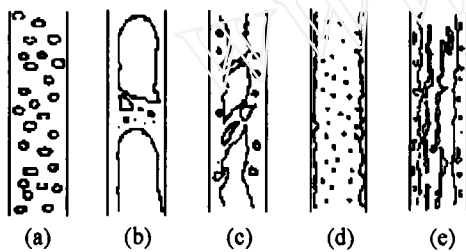


图 1 垂直上升管内气水两相流型示意图

## 4 压力波动特性的试验分析

### 4.1 折算液速恒定时压力波动特性分析

图 2 是垂直管上游管段倾角  $\alpha = -4^\circ$ , 折算液速  $U_{SL} = 0.566 \text{ m/s}$ , 折算气速  $1-U_{SG} = 4.935 \text{ m/s}$ 、 $2-U_{SG} = 7.398 \text{ m/s}$ 、 $3-U_{SG} = 10.263 \text{ m/s}$ 、 $4-U_{SG} = 14.075 \text{ m/s}$  四种段塞流工况下距垂直管入口 400 mm 处压力波动曲线。

从图中可以看出: 垂直管入口处压力呈现类周期性的波动特征。随着折算气速的增加, 压力波动的频率也相应加快。

对该试验条件下的压力波动信号进行统计分析, 其概率密度分布函数 (PDF) 和功率谱密度 (PSD) 如图 3 和图 4 所示。

从图 3 可以看出, 压力信号的概率密度分布大部分呈双峰分布, 也存在单峰分布和多峰分布。因此, 在流型识别中, 仅通过压力波动的概率密度分布不能够很好地识别段塞流流型。

由图 4 可以看出, 垂直管入口处压力波动的频率范围很小 ( $0 \sim 2 \text{ Hz}$ ), 但幅值较大。随着折算气速

的增加, 压力波动的频率范围基本不变, 但是其幅值却得到了很大的提高 ( $22 \sim 60$ ), 垂直管入口处的能量也相应地得到了增强。

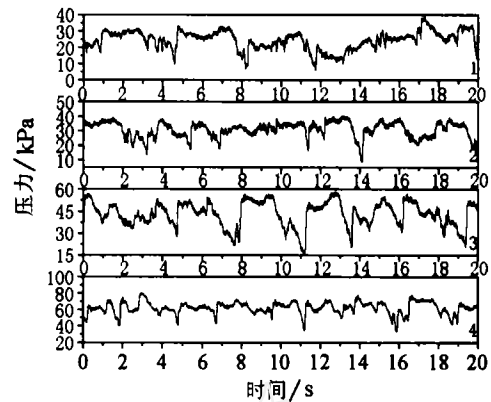


图 2 折算液速恒定时压力波动曲线

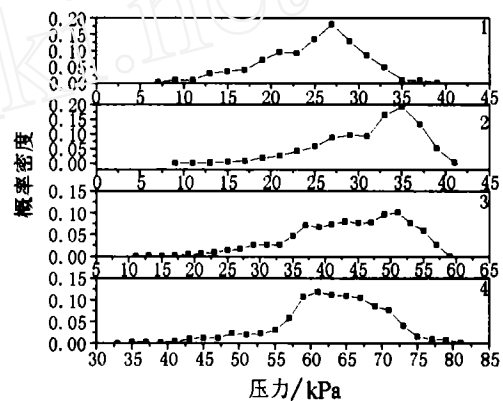


图 3  $U_{SL}$  恒定时压力波动概率密度

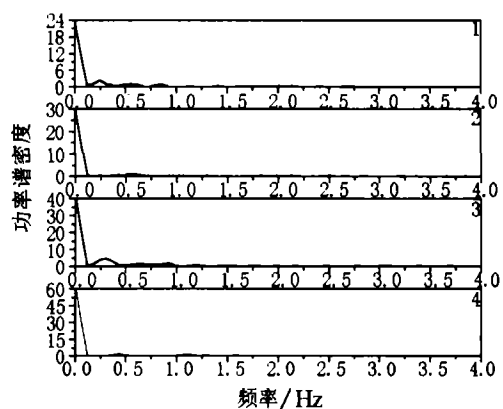


图 4  $U_{SL}$  恒定时压力波动功率谱密度

### 4.2 折算气速恒定时压力波动特性分析

图 5 是折算气速  $U_{SG} = 10.263 \text{ m/s}$ , 折算液速  $1-U_{SL} = 0.146 \text{ m/s}$ 、 $2-U_{SL} = 0.283 \text{ m/s}$ 、 $3-U_{SL} = 0.566 \text{ m/s}$ 、 $4-U_{SL} = 0.835 \text{ m/s}$  时垂直管入口处压力波动曲线。

从图中可以看出, 垂直管入口处压力呈现类周期性的波动特征, 压力随着折算液速的增大而增大。

图 6 和图 7 是该试验条件下的压力波动的概率密度分布函数和功率谱密度。

从图 6 可以看出, 折算气速恒定时垂直管入口处压力波动的概率密度分布也具有单峰、双峰和多峰分布。同时, 随着折算液速的提高, 压力波动的概率密度分布也越趋分散。

从图 7 可以看出, 压力波动的功率谱密度具有频率范围小 (0~1 Hz)、幅值大的特点。随着折算液速的增加, 压力波动的频率范围基本上不发生变化, 而幅值却显著提高。

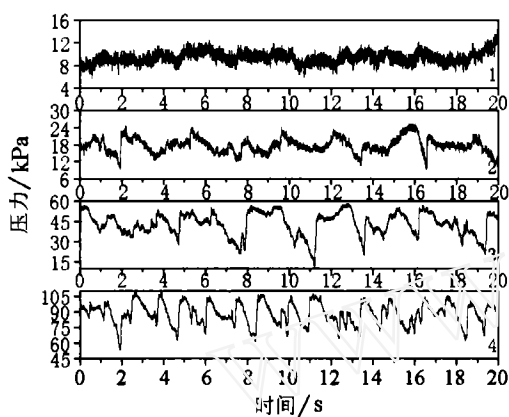


图 5  $U_{SG}$  恒定时压力波动曲线

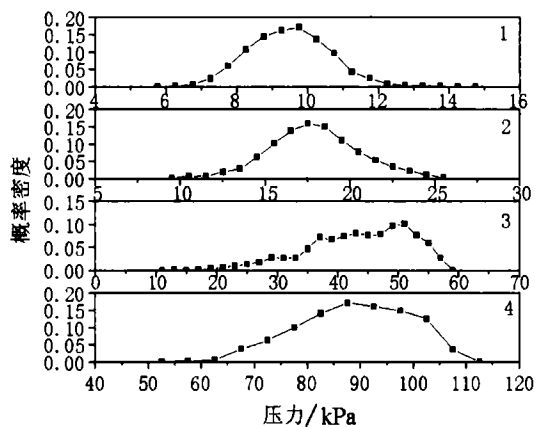


图 6  $U_{SG}$  恒定时压力波动概率密度

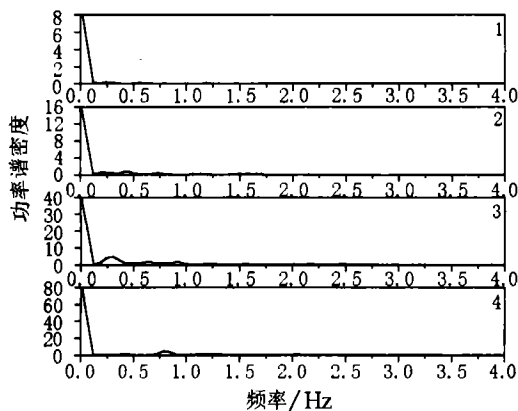


图 7  $U_{SG}$  定时压力波动功率谱密度

## 5 压差波动特性的试验分析

### 5.1 折算液速恒定条件下压差波动特性

试验条件同 4.1, 压差波动曲线如图 8 所示。可以看出, 垂直管压差呈现类周期性的波动特征。随着折算气速的增加, 波动频率呈缓慢增加的趋势, 压差的最大值也随之增加 (30~50 kPa)。

该试验条件下的压差波动概率密度分布和功率谱密度见图 9 和图 10。

由图 9 可以看出, 垂直管段压差波动信号基本上符合正态分布。增大折算气速, 其概率分布的分散性增强, 均值增大。与压力信号不同的是, 压差信号的概率密度分布仅是单峰分布。

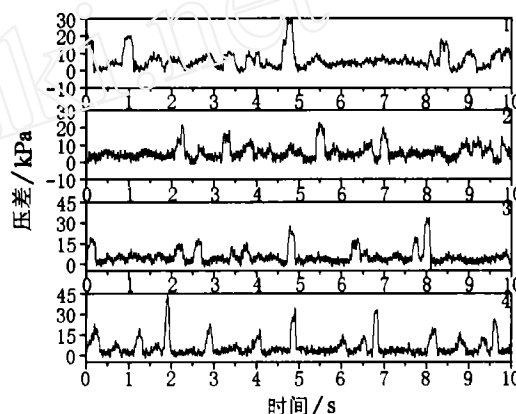


图 8  $U_{SL}$  恒定时压差波动曲线

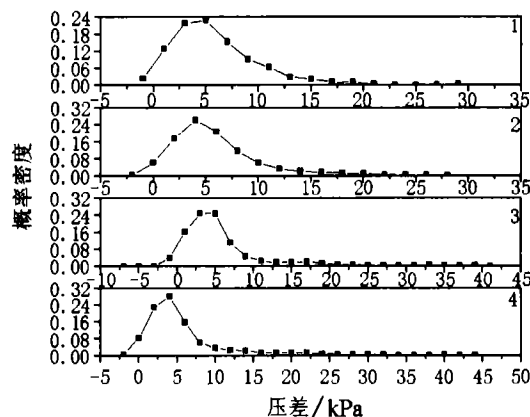


图 9  $U_{SL}$  恒定时压差波动概率密度

从图 10 可以看出, 压差信号的波动频率范围 (0~30 Hz) 较压力信号 (0~1 Hz) 宽, 而其幅值 (0~2) 却比压力信号的幅值小很多。增大折算气速, 压差信号波动的幅值表现为先降后增的趋势, 但是变化的幅度很小, 且波动的频率范围有变宽的趋势。

### 5.2 折算气速恒定条件下压差波动特性

图 11 为与 4.2 相同试验条件下垂直管压差波动曲线。随着折算液速的增加, 垂直管压差最大值增大。

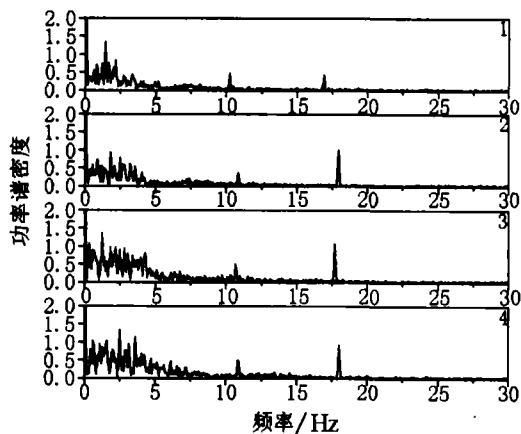
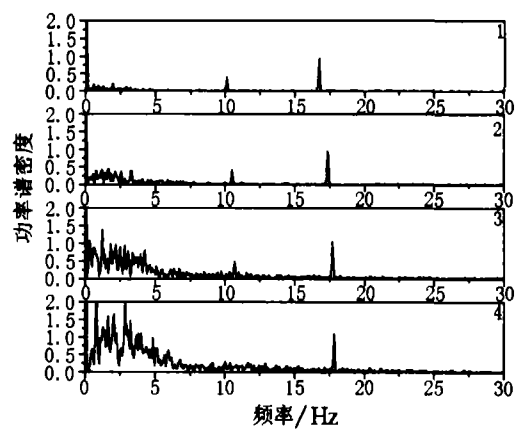
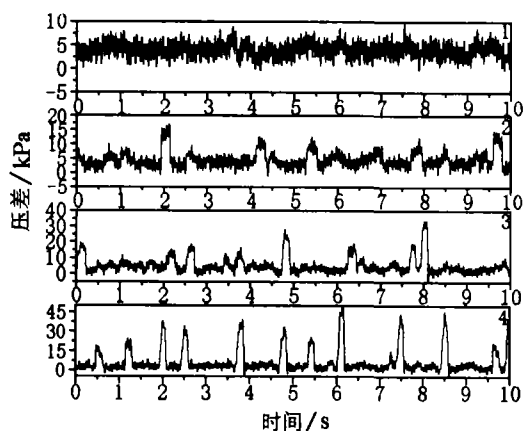
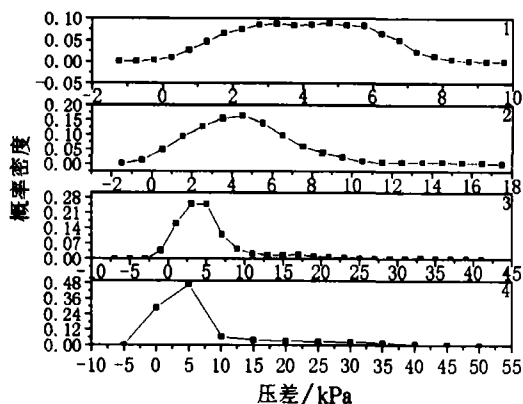
图 10  $U_{SL}$  恒定时压差波动功率谱密度图 13  $U_{SG}$  恒定时压差波动功率谱密度

图 12、图 13 为该试验条件下的压差波动概率密度分布和功率谱密度。

由图 12 可以看出, 压差信号概率密度近似呈正态分布, 随折算液速增加, 概率密度峰值在增加, 波动范围扩大。由图 13 可以看出, 压差信号波动的频率范围 (0~20 Hz) 大于相应的压力波动的频率范围 (0~1 Hz), 其幅值随着折算液速的增加明显增大, 并且出现峰值的频率也相应增加。

图 11  $U_{SG}$  恒定时压差波动曲线图 12  $U_{SG}$  恒定时压差波动概率密度

## 6 结 论

通过对小长径比 ( $L/D=44$ ) 垂直上流管气液流动特性的试验研究, 得出如下主要结论:

(1) 小长径比垂直管内流型为泡状流、塞状流、乳沫状流、环状流和液束环状流。

(2) 管线运行压力受气液流量的影响, 分别或同时增加管线中的气量、液量, 均会造成垂直管入口处压力波动的均值和最大压力的增加, 管线设计过程中需要对此运行参数进行考虑。

(3) 小长径比垂直上流管压力信号的概率密度分布大部分呈双峰分布, 也存在单峰和多峰分布。压力信号概率密度的分散性随折算气速的增大而增强, 随折算液速并没有确定的变化规律。

(4) 垂直管差压信号的概率密度符合正态分布。压差信号的功率谱密度具有频率波动范围宽、幅值小的特点。

## 参 考 文 献

- [1] Tutu N K. Pressure Fluctuations and Flow Pattern Recognition in Vertical Two Phase Gas-Liquid Flows. *Int. J. Multiphase Flow*, 1982, 8(4): 443-447
- [2] Matsui G. Identification of Flow Regimes in Vertical Gas-Liquid Two-Phase Flow Using Differential Pressure Fluctuations. *Int. J. Multiphase Flow*, 1984, 10(6): 711-720
- [3] Nishikawa K, Sekoguchi K, Fukano T. On the Pulsation Phenomena in Gas-Liquid Two-Phase Flow (Relationship Between Pulsating Pressure and Flow Pattern In Upward Two-Phase Flow). *JSME Bulletin*, 1969, 12(54): 1410-1416
- [4] Langford HM, Beasley DE, Ochterbeck JM. Observations on Chaos In Upward Gas-Liquid Flow. In: R A Nelson, Jr T Chopin, S T Thynell. *Proceedings of the ASME Heat Transfer Division, U.S.A.: ASME*, 1998. 247-254
- [5] 夏国栋, 彭岩, 周芳德, 等. 垂直上升气液两相弹状流模型. *化工学报*, 1999, 50(6): 792-798