

水平管段塞流持液率的试验统计分析

赵越超¹ 李志彪² 王 涛³ 何利民⁴ 宋永臣¹

(1. 大连理工大学能源与动力学院; 2. 中国科学院力学研究所; 3. 中海石油研究中心; 4. 中国石油大学(华东)储运与建筑工程学院)

摘 要 对水平管段塞流持液率进行了试验研究。通过对试验结果的统计分析可以得出: 可以利用段塞流持液率的波动情况来确定液塞频率。在段塞流动中, 当气相折算速度和液相折算速度相差不大时, 持液率概率密度函数呈双峰分布; 当液相折算速度不变时, 随着气相折算速度的增大, 持液率概率密度函数第 2 峰值逐渐减小, 直至消失而变为单峰分布; 利用这一特征可初步确定段塞流动中气、液相流量相对大小。折算速度的变化会引起液塞持液率的变化, 液塞持液率随气相折算速度的增大而减小, 随液相折算速度的增大而增大。

关键词 水平管 段塞流 持液率 试验结果 统计分析 概率密度函数

液塞持液率是段塞流特征参数中最重要的参数之一, 是流型转换的重要标志, 也是建立段塞流各种模型所要用的初始变量。长期以来, 绝大多数研究者都是先通过试验测得大量的液塞持液率数据, 然后对这些数据进行统计分析, 探索其变化规律^[1-6]。但是, 这些研究结果远未达到揭示段塞流形成机理的根本目的。基于此, 利用中国石油大学(华东)自主研制的多相流试验装置, 应用自制电导探针方法对水平管段塞流形成规律做了进一步的试验研究, 重点分析了气液两相折算速度对持液率的影响, 并给出了相应的频率变化规律。

1 试验装置与试验条件

试验装置由水罐、离心泵、气体涡轮流量计、液体齿轮流量计、气液混合器、试验管段和气液分离器组成。在试验管段上布置有 11 个 Keller 压力变送器; 在气体涡轮流量计和试验管段入口附近各布置有 1 个 Rosemount 电容式压力变送器; 在试验管段下游安装有长 1 m、直径 50 mm 的有机玻璃管, 管上安装有 2 组电导探针, 以便进行流型的观察和持液率的测量。试验管段和测试点布置示意图见图 1, 图中 T 、 P 为温度、压力测试点; P_0 、 P_1 为 Rose-

mount 压力变送器测试点; $P_2 \sim P_7$ 、 $P_{11} \sim P_{13}$ 为 Keller 压力传感器测试点; T_1 、 T_2 、 T_3 为热电偶测试点; HL_4 和 HL_5 为电导探针布置点。

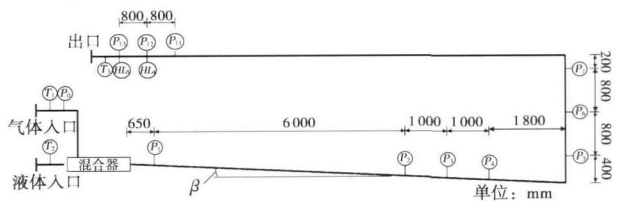


图 1 试验管段及测试点布置示意图

2 试验结果及分析

采用概率密度函数(PDF)法对试验数据进行了统计分析。概率密度函数^[7]的定义如下。

随机过程 $x(t)$ 之值落在 x 以下的概率可写成

$$P(x) = P_{\text{rob}}[x(t) < x] \quad (1)$$

式(1)中 $P(x)$ 为 $x(t)$ 的概率分布函数。

$x(t)$ 的值落在 $x + \Delta x$ 区间的概率为

$$PDF(x) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta x} P_{\text{rob}}[x < x(t) < x + \Delta x] = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta x} \frac{\Delta N}{T} \quad (2)$$

第一作者简介: 赵越超, 男, 2004 年 7 月毕业于中国石油大学(华东)油气储运工程专业, 获硕士学位, 现为大连理工大学能源与动力学院博士研究生, 主要从事油气水多相流动及天然气水合物方面研究工作。地址: 大连理工大学能源与动力学院(邮编: 116024)。E-mail: zhaoychao@163.com。

式(2)中 $PDF(x)$ 为 $x(t)$ 的概率密度函数。

2.1 典型工况下段塞流动中持液率和压力波动分析

图 2 为液相折算速度 v_{SL} 为 0.846 m/s、气相折算速度 v_{SG} 为 13.210 m/s 时水平管段塞流持液率和压力波动曲线及相应的概率密度分布曲线。

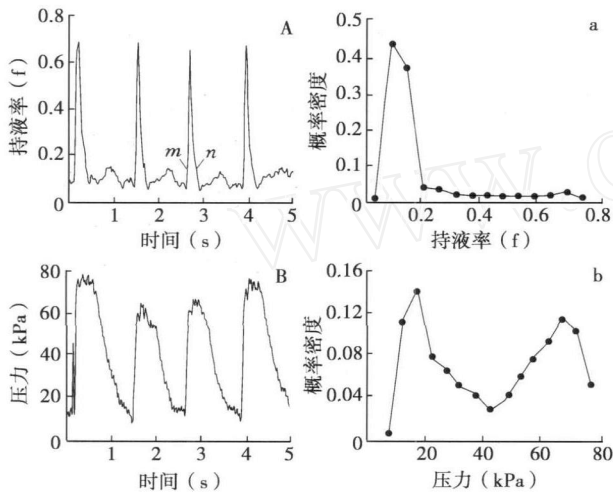


图 2 典型工况下水平管段塞流持液率和压力波动曲线及其概率密度分布曲线

($v_{SL} = 0.846 \text{ m/s}$, $v_{SG} = 13.210 \text{ m/s}$)

由图 2A、B 可以看出完全发展段塞流动中液塞频率的类周期特征。在段塞流动中,段塞单元包括液塞和长气泡及长气泡下层液膜 3 部分。当液塞头部到达探针 (HL_4 或 HL_5) 时,段塞流持液率迅速增加,同时压力也相应增加;当液塞尾部离开探针时,段塞流持液率及压力都减小,但压力的减小滞后于持液率且变化较缓慢,这是由气体和液体的压缩性不同造成的。当液塞头部到达测试点 (P_{12} 或 P_{13}) 时,由于液体压缩性很小,所以压力会迅速增加;而当液塞尾部离开测试点后,由于气体压缩性较大,其对压力的变化有一定的缓冲作用,于是压力的减小滞后于持液率并且变化比较缓慢。

从图 2A 还可以看出,液塞离开测试点时持液率的变化较液塞到达时要慢(如图 2A 中 m 点与 n 点所示),这主要是因为,在段塞流动中气相速度较快而液相速度较慢,液塞前部 (m 点)液相速度小于气相速度,因而液塞中的气泡含量小;而液塞尾部 (n 点)气相速度大于液相速度,部分气体以小气泡的形式溶入到液塞尾部中,于是产生了这样的现象。

2.2 液相折算速度不变、气相折算速度变化时段塞流动中持液率波动分析

图 2 中 a、b 是与图 2 中 A、B 相对应的持液率和压力概率密度分布图,可以看出,在段塞流动中持液率和压力概率密度函数均为双峰分布。这一现象可以通过图 2A、B 中持液率和压力波动曲线来解释。在段塞流动中,当液塞通过测试点时,持液率和压力都处于最大值;当长气泡和液膜通过测试点时,持液率和压力都处于最小值。由于液塞长度远小于长气泡和液膜的长度,所以在段塞流持液率波动曲线上液塞通过测试点的时间远小于长气泡和液膜通过测试点的时间,这就使得概率密度分布图中持液率的第 2 峰值远小于第 1 峰值。由于气体是压缩性较强的流体,它对压力的变化有一定的缓冲作用,这就使得概率密度分布图中压力的第 2 峰值比持液率的第 2 峰值要高得多。

Fossa 等^[8]利用电阻探针分别在内径为 40 mm 和 60 mm 的水平管上对段塞流的含气率(若含气率为 α ,则持液率为 $H_L = 1 - \alpha$)进行了测量,并且分析发现,当稳定段塞流发生时,含气率概率密度函数为双峰分布,其低峰与液塞部分对应,而高峰与长气泡部分对应。这说明,本次试验结果与 Fossa 等的研究结果相一致。另外, Jones 等^[1]在更早的研究中也发现了这一现象。这表明稳定段塞流持液率或含气率的概率密度函数的特点具有普遍性,与管径的大小无关。

图 3 中 A、B、C、D 为液相折算速度 v_{SL} 为 0.566 m/s,气相折算速度 v_{SG} 分别为 2.597、9.246、12.091、17.180 m/s 时水平管段塞流持液率波动曲线,可以看出段塞流动中液塞的类周期性,同时随着气相折算速度的增加,液塞和液膜的最大持液率都有所减小。这是因为,在液相折算速度不变的情况下,增加气相折算速度,液塞内的脉动动能随之增加,液塞所含的气相含量也随之增加。另外,由图 3 中还可以看出,随着气相折算速度的增加,液塞频率明显增大。由质量守恒原理可知,液塞频率增加时,更多的液体将存在于液塞中,这样液膜的持液率就会下降。

图 3 中 a、b、c、d 是与图 3 中 A、B、C、D 相对应的段塞流持液率概率密度分布图,可以看出,在气相折算速度较低的情况下,持液率概率密度函数为双峰分布;而在气相折算速度较高的情况下,持液率概

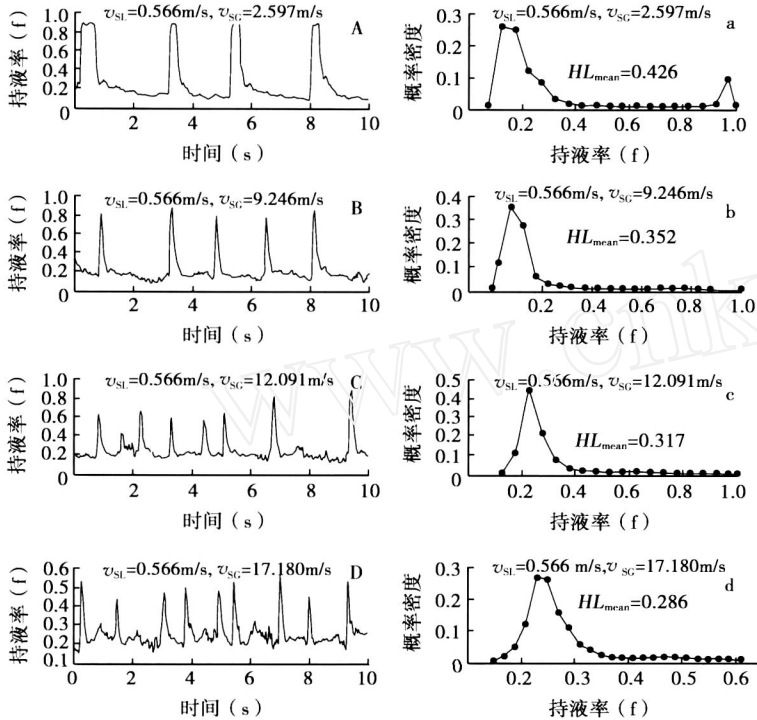


图 3 液相折算速度不变、气相折算速度变化时水平管段塞流持液率波动曲线及其概率密度分布曲线

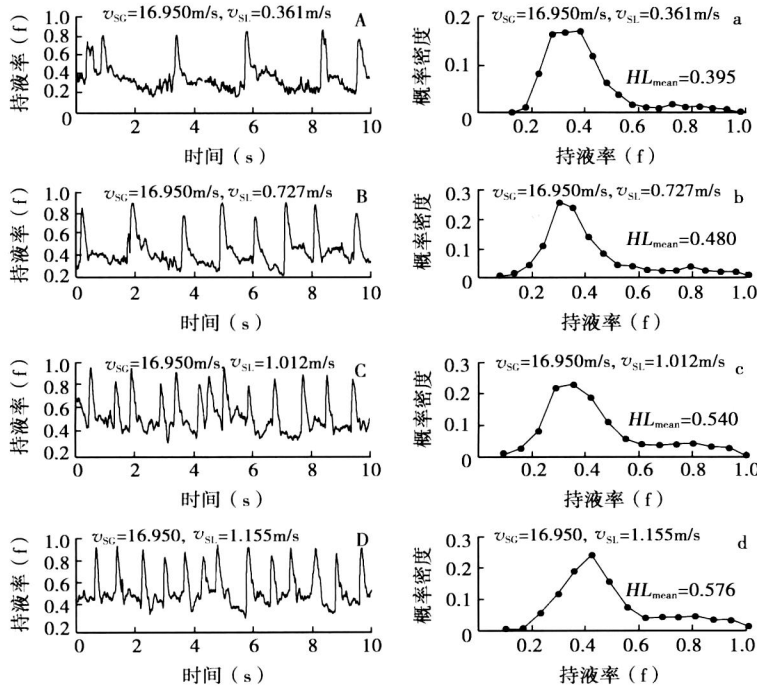


图 4 气相折算速度不变、液相折算速度变化时水平管段塞流持液率波动曲线及其概率密度分布曲线

率密度函数为单峰分布。这是因为，在气相折算速度较低的情况下，液塞长度和液膜长度的比值较大，而在气相折算速度较高的情况下，液塞长度和液膜长度的比值较小，这样液塞和液膜经过测试点的时间差别就很大，于是就会产生这样的分布。并且，随着气相折算速度的增加，段塞流平均持液率 (HL_{mean}) 减小。这主要是因为，气相折算速度增加后，液塞频率也随之增大，而液塞速度又大于液膜速度，于是整个管线内液体速度增大，这就造成了平均持液率的减小。

2.3 气相折算速度不变、液相折算速度变化时段塞流动中持液率波动分析

图 4 中 A、B、C、D 为气相折算速度 v_{SG} 为 16.950 m/s，液相折算速度 v_{SL} 分别为 0.361、0.727、1.012、1.155 m/s 时水平管段塞流持液率波动曲线，可以看出，在气相折算速度不变的情况下，随着液相折算速度的增加，段塞流持液率波动频率显著上升，但这与液相折算速度不变、增大气相折算速度时持液率波动频率的增加明显不同(前者变化较剧烈，而后者变化较缓慢)。

图 4 中 a、b、c、d 是与图 4 中 A、B、C、D 相对应的段塞流持液率概率密度分布图，可以看出，段塞流持液率的概率密度函数都是单峰分布(这是气相折算速度较高造成的)；并且随着液相折算速度的增加，段塞流持液率的概率密度函数逐渐增大。

3 结论

(1) 液塞通过测试点前、后时，其持液率变化比压力变化迅速，因此可以用段塞流持液率的波动情况来确定液塞频率。

(2) 在段塞流动中，当气相折算速度和液相折算速度相差不大时，段塞流持液率的概率密度函数为双峰分

布;当液相折算速度不变时,随着气相折算速度的增大,持液率概率密度函数第2峰值呈减小趋势,直至消失而变为单峰分布。因此,可以利用这一特征初步确定段塞流动中气、液相流量相对大小。

(3) 折算速度的变化会引起段塞流持液率的变化。液相折算速度恒定,增加气相折算速度时,持液率减小;气相折算速度恒定,增加液相折算速度时,持液率增大。

参 考 文 献

- [1] JONES O C, ZUBER N. The interrelation between void fraction fluctuations and flow patterns in two-phase flow[J]. International Journal of Multiphase Flow, 1975, 2(3): 273-306.
- [2] VINCE M A, LAHEY R T JR. On the development of an objective flow regime indicator [J]. International Journal of Multiphase Flow, 1982, 8(2): 93-124.
- [3] WANGJING. Study on void fraction oscillation characteristics in liquid-gas two-phase flow [D]. France: Universit éde Paris 06, 1993.
- [4] LEFTERI H, TSOU KAI A S, MAMORU ISHII, et al. A neurofuzzy methodology for impedance-based multiphase flow identification [J]. Engng. Artif. Intell., 1997, 10(6): 545-555.
- [5] MI Y, ISHII M, TSOU KALASL H. Flow regime identification methodology with neural networks and two-phase flow models [J]. Nuclear Engineering and Design, 2001, 204 (1): 87-100.
- [6] 何利民. 水平油气混输管道中段塞流流动特性研究 [D]. 西安: 西安交通大学, 2002.
- [7] 吕扬生, 边奠英. 随机信号处理导论 [M]. 天津: 天津大学出版社, 1988: 33-40.
- [8] FOSSA M, GU GLIELMINI G, MARCHITTO A. Intermittent flow parameters from void fraction analysis [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2003, 14(4, 5): 161-168.

收稿日期: 2006-10-08 改回日期: 2007-01-30

(编辑: 张金棣)

Statistical analysis about liquid holdup of slug flow in horizontal pipelines

Zhao Yuechao¹ Li Zhibiao² Wang Tao³

He Limin⁴ Song Yongchen¹

(1. School of Energy and Power Engineering, Dalian University of Technology, Liaoning, 116024;

2. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100080;

3. CNOOC Research Center, Beijing, 100027;

4. College of Transport & Storage and Civil Engineering, China University of Petroleum, Shandong, 257061)

Abstract: Slug flow in horizontal pipes is experimentally investigated in order to study the characteristics of liquid holdup. Through the statistical analysis of the test results, it was found that we could obtain the liquid slug frequency from the fluctuation of the slug liquid holdup. When gas superficial velocity was about equal to liquid superficial velocity, the probability density function (PDF) of liquid holdup had a twin-peaked, when liquid superficial velocity was constant, one of the peaks would fade out and disappear with the increase of gas superficial velocity. Through using the characteristics, the relative size of gas and liquid superficial velocity can be set initially. Slug liquid holdup would change with the gas or liquid superficial velocity. It would decrease with the increase of gas superficial velocity and increase with the increase of liquid superficial velocity.

Key words: horizontal pipes; slug flow; liquid holdup; test results; statistical analysis; probability density function