

DOI: 10.16076/j.cnki.cjhd.2018.06.008

# 气体/高黏液体两相间歇流动时液相含率的变化特性研究\*

侯林彤<sup>1,2</sup>, 顾成曦<sup>1,2</sup>, 刘硕<sup>1,2</sup>, 许晶禹<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院力学研究所, 北京 100190, E-mail: xujingyu@imech.ac.cn;

2. 中国科学院大学工程科学学院, 北京 100049)

**摘要:** 准确地获取气液流动过程中相含率的变化, 可以帮助监测长距离混输管道中的流态转化、流量波动以及压力脉动等。该文基于不同工况下的实验数据研究了水平及倾斜管中气体/高黏液体两相间歇流动时液相含率的变化特性。研究结果揭示了水平、垂直和倾斜管路中液相含率的影响因素, 即黏度、倾斜角度、混合雷诺数和弗劳德数等。同时, 发展了一种无量纲指数形式的相含率预测模型, 误差分析表明模型预测结果与实验测试数据较为一致。

**关键词:** 高黏液体; 间歇流动; 液相含率; 预测模型

中图分类号: O359

文献标志码: A

## Study on variation characteristics of liquid phase holdup in intermittent flow of gas/high viscosity liquid

HOU Lin-tong<sup>1,2</sup>, GU Cheng-xi<sup>1,2</sup>, LIU Shuo<sup>1,2</sup>, XU Jing-yu<sup>1,2</sup>

(1. School of Engineering Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

2. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Science, Beijing 100190, China)

**Abstract:** Accurately obtaining the variation of the phase holdup in the gas-liquid two-phase flow process can help to monitor the flow regime translation, flow fluctuation and pressure pulsation in long-distance mixed transportation pipelines. In this paper, based on the experimental data under different working conditions, the variation characteristics of liquid phase holdup during the intermittent gas/high viscosity liquid two-phase flow in horizontal and inclined pipes are studied. The results reveal the influencing factors of liquid holdup in horizontal, vertical and inclined pipelines, such as viscosity, pipe inclination, mixing Reynolds number and Froude number. At the same time, a dimensionless exponential model for phase holdup prediction is developed. The error analysis shows that the model prediction results are consistent with the experimental data.

**Key words:** high viscosity liquid; intermittent flow; liquid phase holdup; prediction model.

\* 收稿日期: 2018-05-10(2018-10-11 修改稿)

基金项目: 国家自然科学基金(51779243)

作者简介: 侯林彤(1997-), 女, 吉林白山人, 硕士研究生.

通讯作者: 许晶禹, E-mail: xujingyu@imech.ac.cn

Received: May 10, 2018 (Revised October 11, 2018)

Project supported by foundation: National Natural Science Foundation of China (51779243)

Biography: HOU Lin-tong (1997-), Female, Master Candidate.

Corresponding author: XU Jing-yu, E-mail: xujingyu@imech.ac.cn

## 引言

随着非常规稠油资源的大规模开发, 针对高黏液体气液两相流动的研究越发突出其重要性。近些年来, 很多学者对其开展了研究工作。许晶禹<sup>[1]</sup>研究了水平管道中非牛顿幂率流体对气液间歇流动的影响, 比较了不同液相介质对摩擦压降的作用, 并指出一些经验模型在低黏领域预测效果较好, 但是不要推广到高黏气液两相流动的预测。随后, Xu等<sup>[2]</sup>针对气体/非牛顿剪切变稀流体两相流动开展了系统的研究, 分析了液相介质、管道倾斜角度以及管径等的变化对于相含率和压降的影响, 并给出了压降预测模型。Matsubara等<sup>[3]</sup>对水平管道中的两相流动开展了研究, 借助于一维动量平衡方程, 给出了流型转换随液相黏度的变化规律。近期, Al-Ruhaimani等<sup>[4]</sup>研究了高黏液体气液两相的垂直管流, 指出液相的黏度对段塞流持液率的影响, 并提出了预测垂直管中持液率的半经验半理论模型。Gao等<sup>[5]</sup>研究了化学添加剂对于气液相含率、压降、液塞频率和表观速度的影响, 给出了Webber数与无量纲液塞速度的指数关系式。

为了准确地获取稠油开发中气液流动过程中相含率的变化, 本文基于不同工况下的实验数据进行了相关的研究工作, 研究主要针对水平、倾斜及垂直管道中气液间歇流动时的液相含率变化以及预测模型建立等展开。

## 1 数据来源及试验工况

本文的实验数据来源于Al-Ruhaimani等、Chen等和Xu等的工作, 详细的试验工况见表1。实验数据包含三种不同管径; 管道倾斜角度从水平到垂直六种角度; 液相介质为原油和CMC溶液。表中下标g和l分别为气相和液相,  $\rho$ 为密度,  $\mu$ 为有效黏度,  $V_{sg}$ 和 $V_{sl}$ 分别为气相表观流速和液相表观流速。

## 2 无量纲参数分析

由于高黏非牛顿流体两相流动非常复杂, 难以通过理论推导获得精确解, 因此本文主要通过无量纲分析来研究液相含率的变化。研究中, 为了使混合Reynolds数和Froude数适用于气体/高黏液体的两相流动, 进行了重新定义:

$$Re_M = \frac{\rho_M V_M D}{\mu_L} \quad (1)$$

$$N_{Fr} = \frac{\sqrt{Dg}}{V_M} \cdot \sqrt{\frac{\rho_L}{\rho_L - \rho_M}} \cdot (0.35 \sin \theta + 0.54 \cos \theta) \quad (2)$$

式中:  $\rho_M$ 和 $\rho_L$ 为混合密度和液相密度,  $D$ 为管道直径,  $\theta$ 为管道倾斜角度,  $V_M$ 为混合速度,  $\mu_L$ 为液相的有效动力黏度,  $g$ 为重力加速度。等式(1)中的混合Reynolds数引入了气液两相混合流速, 同时考虑流动过程中的两相混合密度; 由于混合黏度计算模型众多, 且都存在相应的适用条件, 因此经计算结果和拟合效果显示, 针对本文所研究的高黏稠油, 使用液相有效黏度计算得到的混合Reynolds数与液相含率曲线表现出更直观明显的关系。等式(2)Froude数的定义考虑了管道倾斜角度的影响, 并且通过两个三角函数的权重来确定漂移速度的作用。

图1给出了四种不同管道倾角下Froude数与液相含率的关系曲线。从图中可以看出, 同一种液相条件下, 不同角度的关系曲线非常相近, 尤其在 $1/Froude$ 较小的时候。即角度对于整体的影响被弱化, 进一步证实Froude数定义式的拟合效果较好。

通过控制来流条件, 对水平、垂直及倾斜管流数据进行分析。在控制相应的入口来流条件时(如气相或液相表观流速和气液比等), 作出双对数坐标系下液相含率和混合Reynolds数的关系, 如图2所示。其中图2(b)的横坐标为混合Reynolds数与

表1 数据来源及测试工况  
Table 1. Data source and test conditions

作者	管道直径 (mm)	流体类型	液相物理性质 (kg/m <sup>3</sup> , mPa·s)	表观速度 (m/s)	管道倾斜角度 (°)
AI-RUHAIMANI	50.8	空气-原油	$\mu_L=586, 401, 213, 127$	$V_{sl}=0.05, 0.1, 0.3, 0.5$ $V_{sg}=0.5-5.0$	90
CHEN	47	空气-原油	$\rho_L=960.5$ $\mu_L=340-2\ 410$	$V_{sl}=0.64\pm 0.32$	0
XU	60	空气-CMC 溶液	$\rho_L=999, 999.9, 1\ 000, 1\ 000.4$	$V_{sl}=0.58-1.70$ $V_{sg}=0-2$	5, 15, 30, 75

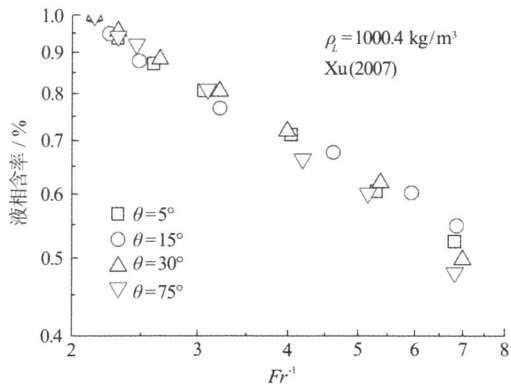


图1 四种不同管道倾角下 Froude 数与液相含率的关系曲线  
Fig.1 Liquid holdup versus Froude number in four different inclinations at constant liquid viscosity

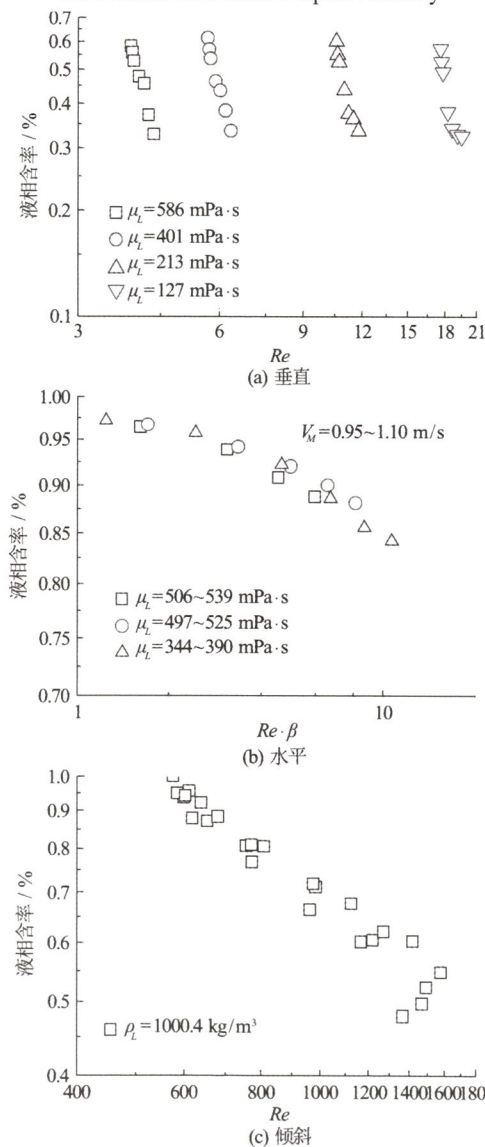


图2 三种管道中混合 Reynolds 与液相含率的关系  
Fig.2 Liquid holdup versus mix Reynolds in vertical(a), horizontal(b) and inclined(c) pipe flow at constant liquid viscosity

入口含气率( $\beta$ )的乘积, 所得到的无量纲参数与液相含率具有更为明显的关系。由于其表现出较强的线

性关系, 因此液相含率与混合Reynolds数之间可用下面的指数关系式表达:

$$H_L = Re_M^\alpha \quad (3)$$

在探讨Froude数与液相含率的关系时, 做出双对数坐标下的关系图, 如图2所示。结果显示出同样的线性关系, 因此可得出液相含率与Froude数同样满足指数相关。由图3可以得出, 相同工况条件下, 随着1/Froude增加, 液相含率减小; 不同液相黏度和Froude数对液相含率的影响不明显。整体来看垂直管流动时液相含率小于水平管和倾斜管, 其原因是垂直管实验中气体流量跨度略大导致的流型差异。图3(c)更进一步证明了液相黏度在Froude数和液相含率的关系中贡献较小, 即黏度对Froude数的影响几乎可以忽略。

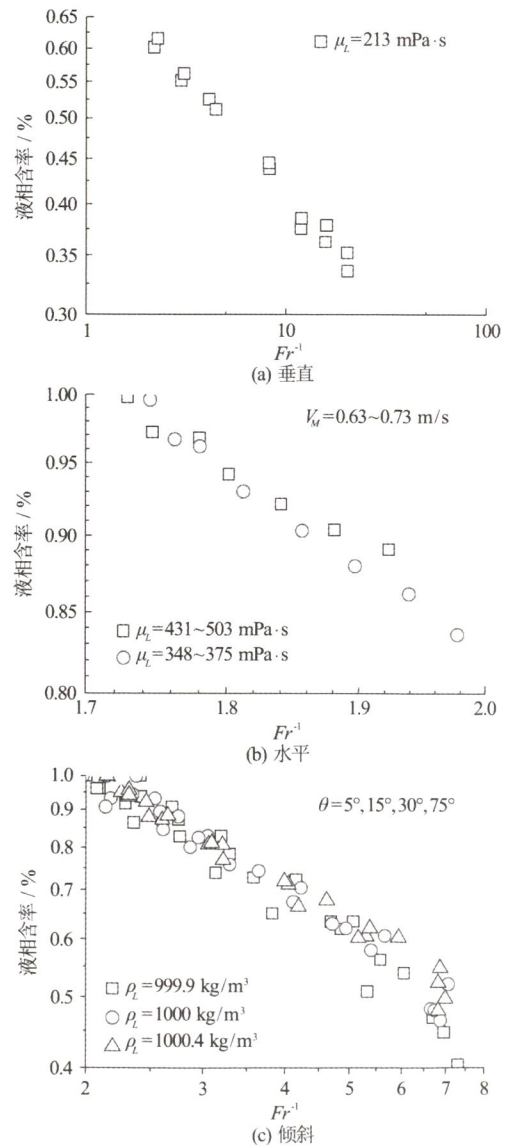


图3 三种管道中 Froude 数与液相含率的关系  
Fig.3 Liquid holdup versus Froude number in vertical(a), horizontal(b) and inclined(c) pipe flow

### 3 液相含率预测模型

图2与图3数据组成来源于相同工况, 两者与液相含率在双对数坐标下表现的线性相关满足线性可叠加, 因此可以得到:

$$H_L = \alpha_1 Re_M^{\alpha_2} N_{Fr}^{(-1)\alpha_3} \quad (4)$$

将该公式进行双对数化处理, 公式化为:

$$\lg H_L = \lg \alpha_1 + \alpha_2 \lg Re_M + \alpha_3 \lg (N_{Fr}^{-1}) \quad (5)$$

式中:  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ 和 $\alpha_3$ 为待定的权重参数。考虑到各参数之间的协同作用, 将方程由矩阵形式表示, 使用MATLAB软件进行矩阵运算:

$$\begin{bmatrix} H_{L1} \\ H_{L2} \\ \vdots \\ H_{Ln} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \lg Re_{M1} & \lg(N_{Fr1}^{-1}) \\ 1 & \lg Re_{M2} & \lg(N_{Fr2}^{-1}) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & \lg Re_{Mn} & \lg(N_{Frm}^{-1}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \end{bmatrix} \quad (6)$$

回归结果如下:

(1) 垂直管:  $\alpha_1=-0.135$ ,  $\alpha_2=0.041$ ,  $\alpha_3=-0.279$   
液相含率预测公式:

$$H_L = 0.733 Re_M^{0.041} N_{Fr}^{0.279} \quad (7)$$

(2) 水平管:  $\alpha_1=-0.017$ ,  $\alpha_2=-0.048$ ,  $\alpha_3=-0.023$   
液相含率预测公式:

$$H_L = 0.962 (Re_M \cdot \beta)^{-0.048} N_{Fr}^{0.023} \quad (8)$$

(3) 倾斜管:  $\alpha_1=0.277$ ,  $\alpha_2=-0.039$ ,  $\alpha_3=-0.554$   
液相含率预测公式:

$$H_L = 1.892 Re_M^{-0.039} N_{Fr}^{0.554} \quad (9)$$

### 4 模型误差分析

用 $H_{L0}$ 表示由上述公式计算得到的液相含率预测值,  $H_L$ 表示实验测得真实值。使用六种统计学参数进行评价上述提出的液相含率预测公式, 分别为: 平均相对误差 ( $\varepsilon_1$ )、绝对平均相对误差 ( $\varepsilon_2$ )、相对误差的标准偏差 ( $\varepsilon_3$ )、平均真实误差 ( $\varepsilon_4$ )、绝

对平均真实误差 ( $\varepsilon_5$ )和真实误差的标准偏差 ( $\varepsilon_6$ )。计算公式如下:

$$\varepsilon_1 = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{H_{L0i} - H_{Li}}{H_{Li}} \times 100\%}{n} \quad (10)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{\sum_{i=1}^n \left| \frac{H_{L0i} - H_{Li}}{H_{Li}} \right| \times 100\%}{n} \quad (11)$$

$$\varepsilon_3 = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left( \frac{H_{L0i} - H_{Li}}{H_{Li}} \times 100\% \right)^2}{n-1}} \quad (12)$$

$$\varepsilon_4 = \frac{\sum_{i=1}^n (H_{L0i} - H_{Li})}{n} \quad (13)$$

$$\varepsilon_5 = \frac{\sum_{i=1}^n |H_{L0i} - H_{Li}|}{n} \quad (14)$$

$$\varepsilon_6 = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [(H_{L0i} - H_{Li}) \times 100\%]^2}{n-1}} \quad (15)$$

计算结果如表2所示。表中分别列出了垂直管、水平管和倾斜管流中的液相含率实验真实值与公式预测值的六种误差参数计算结果。结果表明垂直管、水平管和倾斜管流的各个统计学参数均控制在 $\pm 20\%$ 范围内, 预测效果良好。

表2 液相含率的真实值和公式预测值的统计学参数汇总表  
Table 2. Summary of the statistical values of the true values of the liquid holdup and the predicted values of the formula

统计学参数	垂直管	水平管	倾斜管
$\varepsilon_1(\%)$	-1.8310	-2.142	-1.401
$\varepsilon_2(\%)$	10.101	3.452	17.113
$\varepsilon_3(\%)$	$\pm 13.579$	$\pm 0.147$	$\pm 0.119$
$\varepsilon_4(\%)$	-1.6540	-0.020	-2.200
$\varepsilon_5(\%)$	5.4750	3.212	12.968
$\varepsilon_6(\%)$	$\pm 7.6590$	$\pm 3.945$	$\pm 15.858$

图4展示了液相含率预测值和真实值的对比图, 可以看出预测值和实验测得真实值具有较好的一致性, 且超过85%的数据在 $\pm 20\%$ 的误差线以内。

### 5 结论

本文研究了气体/高黏液体两相管流中不同黏

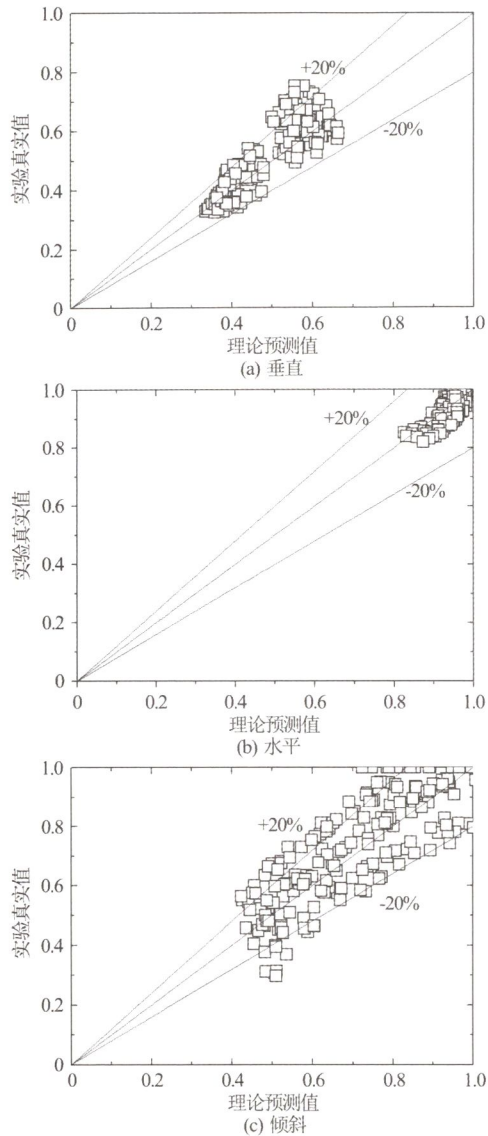


图4 管道中理论预测值与实验测量值的比较

Fig.4 Comparison between the referred data and predictions by the model in vertical(a), horizontal(b) and inclined (c) pipe flow

度和不同倾斜角度下液相含率的变化特性，并发展了液相含率的预测模型，同时对该模型进行了误差计算分析，得出了以下结论：

使用Reynolds数和Froude对实验数据进行了处理和分析，结果表明水平管中气体/高黏液体间歇流动过程中液相含率数值普遍较大；混合Reynolds数对水平管气液两相流动中液相含率的影响最大，而对垂直管中液相含率影响小，且水平管中液相黏度

和气相含率对整个流动的影响较大；不同管道倾角下Froude数与液相含率均呈正相关。修正后的Froude数定义式将管道倾角对流动的影响考虑进去，且在角度为 $5^{\circ}$ - $30^{\circ}$ 时表现较好；垂直管中Froude数对液相含率的影响远大于混合Reynolds数的影响，表现出在垂直管中重力效应引起的速度滑移较为明显而液相黏度影响较弱。经回归分析得到的预测公式，通过与实验数据对比发现，该公式的预测精度较好。

## 参 考 文 献:

- [1] 许晶禹, 吴应湘, 李东晖. 液相介质对水平气液间歇流动的压降影响[J]. 过程工程学报, 2006, 6(2): 161-166.  
XU Jing-yu, WU Ying-xiang, LI Dong-hui. Effects of liquid phase properties on pressure drop during horizontal gas-liquid intermittent flow[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2006, 6(2): 161-166.
- [2] XU J, WU Y, Shi Z, et al. Studies on two-phase co-current air/non-Newtonian shear-thinning fluid flows in inclined smooth pipes[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2007, 33(9): 948-969.
- [3] MATSUBARA H, NAITO K. Effect of liquid viscosity on flow patterns of gas-liquid two-phase flow in a horizontal Pipe[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2011, 37(10): 1277-1281.
- [4] AL-RUHAIMANI F, PEREYRA E, SARICA C, et al. Prediction of slug-liquid holdup for high-viscosity oils in upward gas/liquid vertical-pipe flow[J]. Spe Production & Operations, 2017.
- [5] GAO M, XU J. Characteristics of air-water upward intermittent flows with surfactant additive in a pipeline-riser system[J]. Journal of Hydrodynamics, 2018, 30(2): 287-295.
- [6] CHEN X, XU J, ZHANG J. A simple model for predicting the two-phase heavy crude oil horizontal flow with low gas fraction[J]. Chemical Engineering Communications, 2016, 203(9): 1131-1138.