

# 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>, 许晶禹<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> (中国科学院力学研究所, 北京 100190)

<sup>2</sup> (中国科学院大学工程科学学院, 北京 100049, Email: [xujingyu@imech.ac.cn](mailto:xujingyu@imech.ac.cn))

**摘要:** 为了准确地了解两相流动过程中相含率的变化情况从而实现监测长距离管道混输中的流态转化、流量波动以及压力脉动等, 本研究基于实验数据研究了垂直管、水平管、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(包括黏度、倾斜角度、混合雷诺数和弗汝德数等)和变化趋势。同时提出了液相含率预测模型。误差分析表明, 模型预测结果与实验测试数据较为一致。该研究对油气混输中的安全监控和保障具有重要意义。

**关键词:** 高黏液体; 间歇流动; 液相含率; 预测模型

## 1 引言

伴随着非常规资源中稠油/超稠油的大幅度开采, 原油黏度越来越大, 因此对气体/高黏原油两相流动的研究已成为石油工业中多相流研究领域的重要内容之一<sup>[1-7]</sup>。本研究依据已有文献中的实验数据, 综合考虑高黏液相介质和多种管道倾斜角度等对气/高黏液体两相间歇流动时液相含率进行了研究, 同时建立了液相含率预测模型。

## 2 实验数据分析

研究中, 主要考虑混合雷诺数和弗汝德数对液相含率的影响, 由实验测得数据结合理论推导修正混合雷诺数和弗汝德数, 得到新的定义式:

$$Re_M = \frac{\rho_M V_M D}{\mu_L}$$

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

本研究定义的混合雷诺数相对于单相流而言，考虑了气液两相流特殊的流动特性并呈现出不同于单相流的拓扑空间，同时考虑流动过程中的两相速度滑移，因此采用混合密度和混合速度；与普遍的两相流混合雷诺数计算模型比较，混合黏度计算模型众多，且都存在相应的适用条件。计算结果和拟合效果显示，针对本文所研究的内容，使用液相黏度计算得到的混合雷诺数与液相含率曲线表现出更直观明显的关系。

针对弗汝德数的定义，考虑两相流动过程中的漂移速度和管道倾斜角度的影响，参考漂移速度的定义模型确定关于角度的两个三角函数的权重。通过控制来流条件，对垂直管流、水平管流、倾斜管流数据进行分析，水平管与倾斜管在该条件下混合雷诺数与液相含率关系变化趋势相同（图 1）。

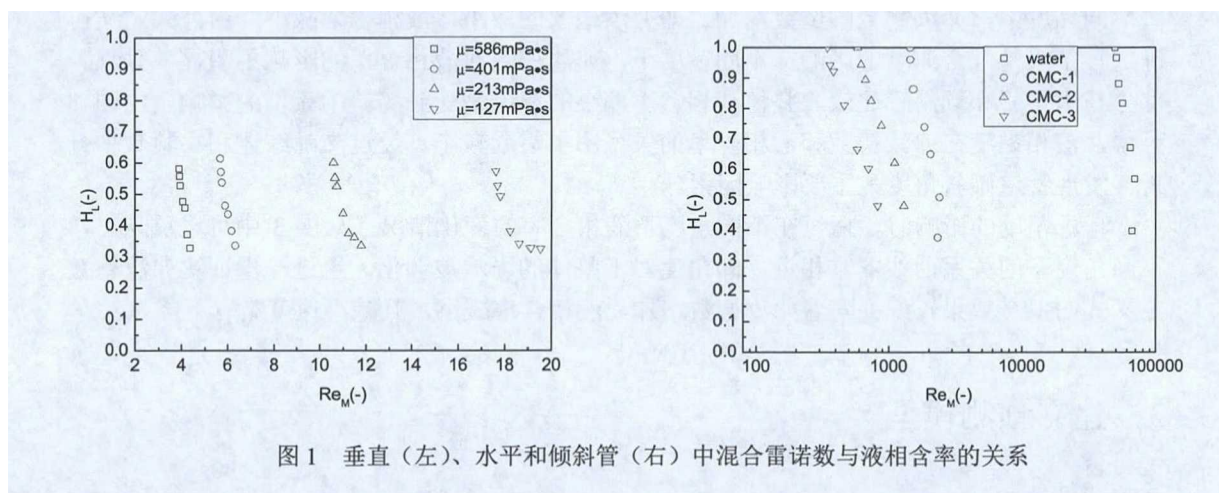


图 1 垂直（左）、水平和倾斜管（右）中混合雷诺数与液相含率的关系

固定液相表观流速，气液比的变化区间和规律相同。图 2 显示：同黏度下，随着混合雷诺数增加，液相含率呈下降趋势，由定义式分析可得，是由混合速度和密度项的差异所导致；随着黏度增加，曲线向右偏移，反映出黏度的影响。

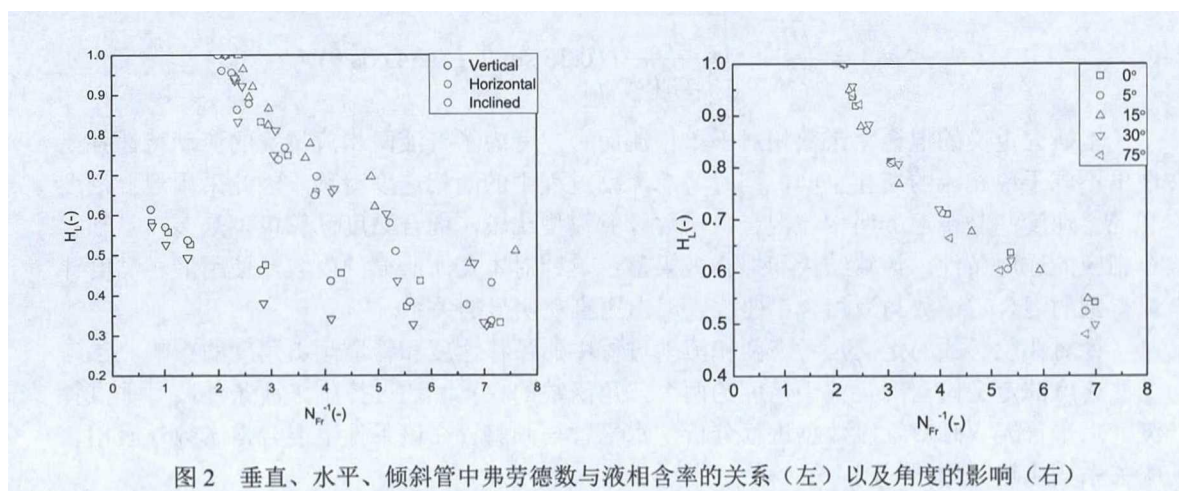


图2 垂直、水平、倾斜管中弗劳德数与液相含率的关系（左）以及角度的影响（右）

同黏度下，弗汝德数的倒数增加，即弗汝德数的减小，液相含率减小，由公式定义可确定该结果是混合速度的影响；不同黏度下，弗汝德数对液相含率的影响不明显。垂直管部分与水平管和倾斜管比较，整体液相含率偏小的原因是受到实验中流型的影响。由图3可得，液相黏度在弗汝德数和液相含率的关系图中贡献较小，经过文献综述和实验数据分析，发现管道倾斜角度为主要影响因素。

考虑角度的影响时，探讨在不同角度下液相含率的变化情况：从图3中可以反映出，不同角度下的关系曲线非常相近，即角度对于整体的影响被弱化，也进一步证实弗汝德数定义式的拟合效果较好；随着弗汝德数增加，液相含率减小，且减小速度略有下降。

### 3 建立预测模型

经过上一章实验数据分析以及文献调研，可初步确定液相含率分别与混合雷诺数和弗汝德数呈幂指数关系，关系公式形式为：

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

将该公式进行双对数处理，公式化为：

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

式中， $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 、 $\alpha_3$ 为待定参数。考虑到各参数之间的协同作用，故采用同时确定所有参数的方法。将方程由矩阵形式表示，使用MATLAB软件进行矩阵运算：

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

回归结果如下:

- 垂直管:  $\alpha_1 = -0.135$ ,  $\alpha_2 = 0.041$ ,  $\alpha_3 = -0.279$
- 液相含率预测公式:  $H_L = 0.750 \times Re_M^{0.041} \times N_{Fr}^{(-1) \times (-0.279)}$
- 水平管:  $\alpha_1 = 0.296$ ,  $\alpha_2 = -0.040$ ,  $\alpha_3 = -0.540$
- 液相含率预测公式:  $H_L = 1.977 \times Re_M^{-0.040} \times N_{Fr}^{(-1) \times (-0.540)}$
- 倾斜管:  $\alpha_1 = 0.327$ ,  $\alpha_2 = -0.055$ ,  $\alpha_3 = -0.55$
- 液相含率预测公式:  $H_L = 2.124 \times Re_M^{-0.055} \times N_{Fr}^{(-1) \times (-0.553)}$

对以上公式进行误差分析, 使用 6 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 ( $\varepsilon_5$ )、真实误差的标准偏差 ( $\varepsilon_6$ )。计算公式如下:

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

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

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

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

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

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

上述 6 个参数从垂直管、水平管和倾斜管 3 个方面进行计算。计算结果见表 1。

表1 三种管道实验液相含率的真实值和公式预测值的统计学参数汇总

统计学参数	$\varepsilon_1(\%)$	$\varepsilon_2(\%)$	$\varepsilon_3(\%)$	$\varepsilon_4(\%)$	$\varepsilon_5(\%)$	$\varepsilon_6(\%)$
垂直管	-1.831	10.101	±13.579	-1.654	5.475	±7.659
水平管	-0.956	11.729	±16.335	-1.479	8.685	±1.423
倾斜管	-3.304	13.953	±17.580	3.069	10.995	±2.122

## 4 结论

研究了气体/高黏液体两相管流中不同黏度、不同倾斜角度下液相含率的变化特性,并建立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:考虑气体/高黏液体两相流动的特殊情况,修正现有雷诺数和弗汝德数定义式。使用无量纲参数对实验数据进行处理结果表明,混合雷诺数对水平、倾斜管中气液两相流动中液相含率的影响较大,而对垂直管中液相含率影响小;不同管道倾角下弗汝德数与液相含率均呈正相关。垂直管中弗汝德数对液相含率的影响远大于混合雷诺数的影响。经回归分析得到垂直、水平、倾斜管中气/高黏液体两相间歇流动时液相含率的预测公式;误差分析显示,预测结果与实验测得真实值有良好的 consistency。

## 参考文献

- 1 许晶禹,吴应湘,李东晖,等. 液相物性对气液两相管流流型和压降影响的研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2005, 13(2): 111-119.
- 2 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.
- 3 罗小明,何利民,吕宇玲. 水平管段塞流持液率的波动特性[J]. 高校化学工程学报, 2009, 23(4): 719-723.
- 4 刘文红,郭烈锦,张西民,等. 水平直圆管内油气两相流的压降[J]. 化工学报, 2004, 55(6): 907-912.
- 5 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.
- 6 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.
- 7 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.

## **Studies on characteristics of liquid holdup during gas/high viscosity liquid intermittent flow**

HOU Lin-tong<sup>1,2</sup>, XU Jing-yu<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup>Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

<sup>2</sup>School of Engineering Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** In order to understand the variation characteristics of liquid holdup during gas/high viscosity liquid two-phase flow accurately, thus monitoring the flow regime, the flux and the pulsing of pressure of mixing transportation in the pipe. An study has been done on variation characteristics of liquid holdup during gas/high viscosity liquid two-phase intermittent flow based on vertical, horizontal and inclined pipes. The effects of the liquid holdup (including liquid viscosity, inclined angles of the pipe, mixed Reynolds number, Froude number and so on.) and variation tendency have been illustrated. It proposed a prediction model of liquid holdup in this work. The predicted values were found to be in good agreement with the experimental results. This results might be helpful to safety monitoring and guarantee in the gas/oil mixing transportation.

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