赫歇尔-伯克利流体气液分层管流持液率特性研究

侯林彤[1,2]，刘硕[2]，张健[2]，王黎松[1,2]，许晶禹[1,2]

（1. 中国科学院大学 工程科学学院，北京，100049；2. 中国科学院 力学研究所，北京，100190；E-mail: xujingyu@imech.ac.cn）

摘要：以牛顿流体、幂率流体和宾汉流体建立的气-液流动理论模型不能准确应用于非常规石油领域。为此，基于赫歇尔-伯克利流体本构，借助双流体理论和流动控制方程，推导了两相分层管流中持液率预测模型。综合考虑非牛顿流体流变特性参数，流动条件及管道倾斜角度对赫歇尔-伯克利流体气-液分层流动的影响。结果表明，非牛顿流变特性(如幂律指数和屈服应力)对两相流动中持液率具有显著影响，具体表现为液体屈服性和剪切稀化特性的增强将导致持液率的增加。对比实验数据，持液率计算模型显示出较好的预测效果。该预测模型的主要特征是，即使液体具有复杂的流变性或包含固体颗粒，也可以通过气体/非牛顿流体行为描述两相分层流动。该模型为倾斜管中复杂流体的气-液流动特性研究提供了新的见解。

关键词：赫歇尔-伯克利流体；气液分层流；持液率；预测模型

1 引言

在油气混输过程中，由于受重力场作用，分层流在水平或倾斜管道系统中较为常见。在实验研究和实际应用中，分层流动中气相一般是的空气或天然气，为典型的牛顿流体，而液相，液-液混合相和液-固混合相可以视为非牛顿流体类型。通常用于表征此类非牛顿流体流变特性的本构关系有：幂律模型，宾汉模型和赫歇尔-伯克利模型。在常规石油工业中，气液两相分层管流动的研究已经成熟，大多采用牛顿和幂律流体模型。但是，随着非常规石油资源的开发，具有屈服应力的剪切稀化流体在工业应用中起着重要作用。

考虑到幂率流体和宾汉流体本构模型的局限性，它们不能很好地表征石油工程领域的稠油，超稠油和含蜡含砂原油等流体特性。因此，本研究采用赫歇尔-伯克利本构模型来更准确地描述上述非牛顿流体。赫歇尔-伯克利流体模型可以表征流体的屈服性和假塑性，包含幂率流体和宾汉流体两种本构特点，并且可以描述较大剪切速率范围内流体的流变性质。为了拓展对气体/非牛顿流体分层流动的研究，本文基于赫歇尔-伯克利流体本构，在水平和

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

倾斜管道且低相速度条件下对气-液分层管流进行了理论推导。研究提出共流条件下的气液分层流动的持液率预测模型。这项工作综合考虑了不同流变特性对两相分层流动行为特性的影响，为实际工程提供理论指导。

2 分层流理论推导

2.1 一维双流体模型

Taitel & Dukler 提出了气体/牛顿流体的两相水平分层流理论模型，Heywood & Charles 将其进一步扩展到非牛顿液相。气液两相分层流研究采用一维双流体模型进行理论推导，假设两相流体沿管道长度一维流动，不考虑传热、传质以及相变，并且忽略液相中加速度和水力梯度的影响。双流体模型中各相稳态流动的控制方程如下：

$$-A_G\left(\frac{\mathrm{d}P}{\mathrm{d}x}\right)_{TP}-\tau_L S_L+\tau_i S_i-\rho_L A_L g\sin\beta=0 \tag{1}$$

$$-A_G\left(\frac{\mathrm{d}P}{\mathrm{d}x}\right)_{TP}-\tau_G S_G-\tau_i S_i-\rho_G A_G g\sin\beta=0 \tag{2}$$

其中，A 是管道截面积，τ 是剪切应力，S 是湿周，ρ 是密度，g 是重力加速度，β 为管道倾斜角度。下标 TP, L, G 和 i 分别表示两相，液相，气相和界面。x 是轴向坐标，P 是静压力。得到两相动量方程为：

$$\tau_G\frac{S_G}{A_G}-\tau_L\frac{S_L}{A_L}+\tau_i S_i\left(\frac{1}{A_L}+\frac{1}{A_G}\right)-(\rho_L-\rho_G)g\sin\beta=0 \tag{3}$$

壁面及界面切应力由定义可知:

$$\tau_G=f_G\cdot\frac{\rho_G u_G^{\ 2}}{2} \tag{4}$$

$$\tau_L=f_L\cdot\frac{\rho_L u_L^{\ 2}}{2} \tag{5}$$

$$\tau_i=f_i\cdot\frac{\rho_G(u_G-u_L)|u_G-u_L|}{2} \tag{6}$$

其中 u 为平均速度， f 为摩擦因子，可由下式定义：

$$f_{L,G}=C_{L,G}\,\mathrm{Re}_{L,G}^{\ -n} \tag{7}$$

当气-液两相处于层流时满足 $C_L=C_G=16,\ n=m=1$.

界面摩擦因子通常近似等于具有较高速度的相的壁面摩擦因子，即气-液分层流满足当 $|u_G|>|u_L|$ 时， $f_i=f_G$ 。

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

气相牛顿流体雷诺数表示为：

$$\mathrm{Re_G}=\frac{\rho_G u_G D_G}{\mu_G} \tag{8}$$

$$D_G=\frac{4A_G}{S_G+S_i} \tag{9}$$

2.2 圆管内赫歇尔-伯克利流体

赫歇尔-伯克利流体本构方程可化为：

$$-\frac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}r}=\begin{cases}\left[\frac{1}{K}\left(\frac{\Delta P}{2L}r-\tau_0\right)\right]^{1/n} & R_0\le r\le R\\ 0 & r<R_0\end{cases} \tag{10}$$

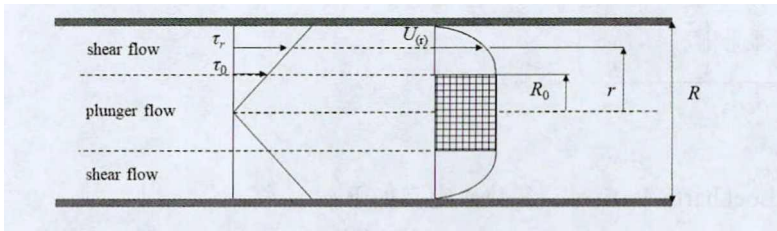


图 1 赫歇尔-伯克利流体剪应力和速度分布

液相雷诺数定义如公式(11)所示，圆管内速度分布见图 1。

$$\mathrm{Re_L}=\frac{8\rho_L u_{ann}^{\ 2}}{\tau_0+K\left(\frac{8u_{ann}}{D_{\mathrm{shear}}}\right)^n} \tag{11}$$

$$u_{ann}=\frac{Q-Q_{\mathrm{plug}}}{\pi(R^2-R_0^{\ 2})} \tag{12}$$

$$D_{\mathrm{shear}}=2(R-R_0)=D_L(1-\phi) \tag{13}$$

$$D_L=\frac{4A_L}{S_L} \tag{14}$$

其中，D_L, D_G 是液相和气相的当量直径。τ_0 和 τ 分别是屈服应力和壁面剪应力。$\dot{\gamma}$ 是应变率，K 是稠度系数，n 是幂律指数。$\Delta P/L$ 为液相压力梯度。

在液相雷诺数的表达式中：u_{ann} 是速梯区速度，D_{shear} 为速梯区尺寸，可以通过液相当量直径计算得到。ϕ 是塞流区半径 R_0 与液相当量半径 R 之比。$Q-Q_{\mathrm{plug}}$ 为速梯度区流量，

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

可以通过积分液相本构方程计算得到，见式(15)。

$$Q-Q_{\text{plug}}=\pi\frac{nR^{\frac{3n+1}{n}}(1-\phi)^{\frac{2n+1}{n}}(1+2n+\phi+4n\phi)\left(\frac{\Delta P}{2KL}\right)^{\frac{1}{n}}}{(3n+1)(2n+1)} \tag{15}$$

2.3 量纲分析

在稳定和充分发展的气液分层管流中，两相均视为不可压缩层流，通过量纲分析得到两相分层流动的无量纲动量方程：

$$\frac{\pi\tilde{S}_G(\tilde{S}_G+\tilde{S}_i)}{2\tilde{A}_G^{\,3}}\cdot\tilde{W}-\frac{2^{\frac{4}{n}}(1-\phi^2)^2(3n+1)^2(2n+1)^2}{n^2(1-\phi)^{\frac{2}{n}+4}(1+2n+\phi+4n\phi)^2}\cdot\left[\phi+4^n\frac{n^2(1-\phi)^{n+1}(1+2n+\phi+4n\phi)^n}{(3n+1)^n(2n+1)^n(1-\phi^2)n}\right]\cdot\frac{\tilde{u}_L^{\,2}\tilde{S}_Lq^2}{\tilde{D}_L^{\frac{2}{n}+1}\tilde{A}_L(X^2)^{\frac{2}{n}-1}}\cdot\tilde{P}$$
$$+\frac{\pi\tilde{S}_i(\tilde{S}_G+\tilde{S}_i)(\tilde{A}_G+\tilde{A}_L)\left(\tilde{A}_G^{\,-1}-\frac{\tilde{A}_L^{\,-1}}{q}\right)^2}{\tilde{A}_L\tilde{A}_G}\cdot\tilde{W}-\tilde{Y}=0 \tag{16}$$

其中，X^2 为 Loekhart-Martinelli 参数，定义如下：

$$X^2=\frac{(\mathrm{d}P/\mathrm{d}x)_{SL}}{(\mathrm{d}P/\mathrm{d}x)_{SG}} \tag{17}$$

此处，$\mathrm{d}P_F/\mathrm{d}x$ 为摩擦压降，下标 SG 和 SL 分别表示管道内单独气相和单独液相情况。方程中引入以下无量纲参数：

$$\tilde{P}=\frac{U_{SG}^{\,2}K^{\frac{2}{n}}}{D^{\frac{2}{n}+2}(\mathrm{d}P/\mathrm{d}x)_{\mathrm{SG}}^{\frac{2}{n}}} \tag{18}$$

$$\tilde{W}=\frac{U_{SG}^{\,n}\mu_G}{D^{n+1}(\mathrm{d}P/\mathrm{d}x)_{\mathrm{SG}}} \tag{19}$$

$$\tilde{Y}=\frac{(\rho_L-\rho_G)g\sin\beta}{(\mathrm{d}P/\mathrm{d}x)_{SG}} \tag{20}$$

$$(\mathrm{d}P/\mathrm{d}x)_{SL}=\frac{4}{D}K\left(\frac{3n+1}{4n}\right)^n\left(\frac{1}{1-\phi}\right)\left(\frac{1}{1-a\phi-b\phi^2-c\phi^3}\right)^n\left(\frac{8U_{SL}}{D}\right)^n \tag{21}$$

$$(\mathrm{d}P/\mathrm{d}x)_{SG}=\frac{\tau_GS}{A}=\frac{32\mu_GU_{SG}}{D^2} \tag{22}$$

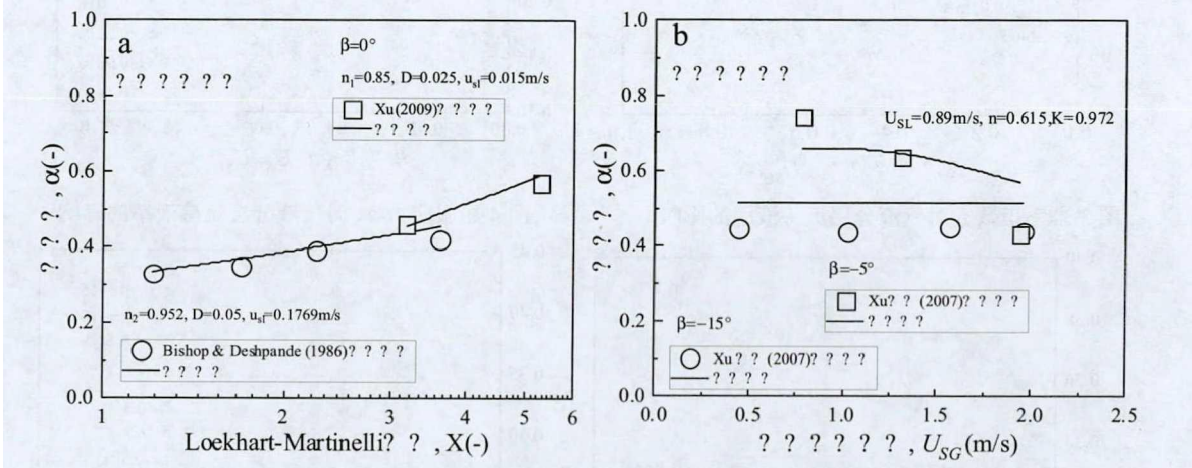
通过求解式(16)中的无量纲液面高度 $\tilde{h}_L$，代入下式可得到持液率预测模型。

$$\alpha=\frac{1}{\pi}\left[\cos^{-1}(1-2\tilde{h}_L)-(1-2\tilde{h}_L)\sqrt{1-(1-2\tilde{h}_L)^2}\right] \tag{23}$$

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

3 结果讨论和分析

为了验证两相分层流的方法，将通过式（16）和式（23）所得到的持液率预测模型与Xu[3-4]和 Dishop＆Deshpande[5]的原始实验数据比对，如图 2 所示。结果表明，持液率数据吻合良好。



(a) 水平管分层流　　(b) 倾斜管分层流

图 2 持液率预测模型与 Xu(2009), Xu 等(2007) 和 Bishop & Deshpande (1986)的实验数据比对

图 2(b)表明，预测模型与实验数据之间存在差异，其原因有两个：①在较高的液相表观速度下形成的流动模式不是稳定的分层流，而是从分层流向间歇流的过渡流态；②在向下倾斜的管道中，重力效应随着角度的变化而增加，进一步导致流动的不稳定。

3.1 流体流变特性对分层流持液率的影响

在非牛顿液体不同流变特性下，表观气相流速与持液率之间的关系如图 3 所示，当表观气体速度较小时，幂律指数 n 对持液率的影响不形成规律。由于较小的表观气体流速导致两相之间的相互作用弱，这意味着气相和液相之间的动量交换和干扰较弱。当气体速度增加到一定值时，流动显示出明显的规律：随着幂律指数的降低，持液率增加。因为随着 n 的减小，液体的黏度增加，液体的流动性减弱，这表现为液面高度的累积。另外气体/ 赫歇尔-伯克利流体分层流需要合适的气液比范围。当液-气速度比较小时，可以满足所研究的分层流型。

图 4 表示持液率与 τ_0 呈正相关，是由于液体的黏度随着屈服应力的增加而增大，表现较差的跟随性。在流动过程中，相间界面摩擦压力不足以驱动高黏度流体，从而导致液相高度和持液率的增加。

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

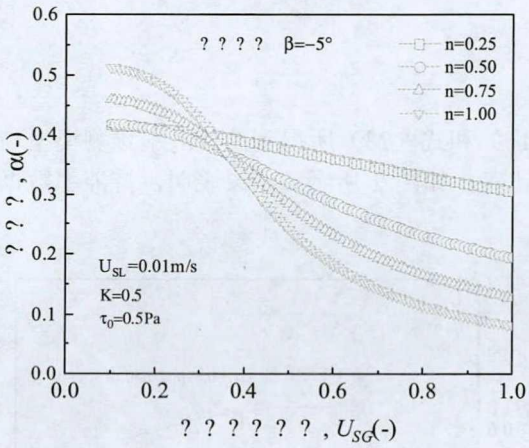


图 3 幂率指数 n 对气液分层流持液率的影响

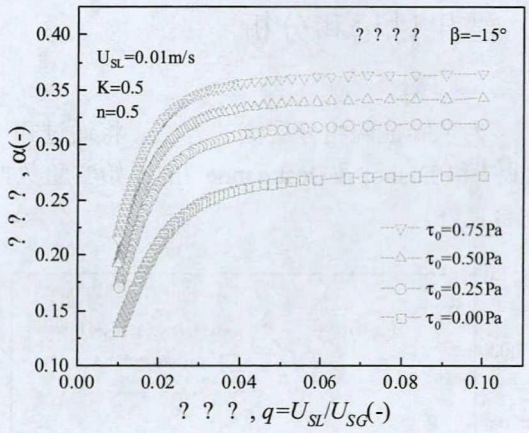


图 4 屈服应力 τ_0 对气液分层流持液率的影响

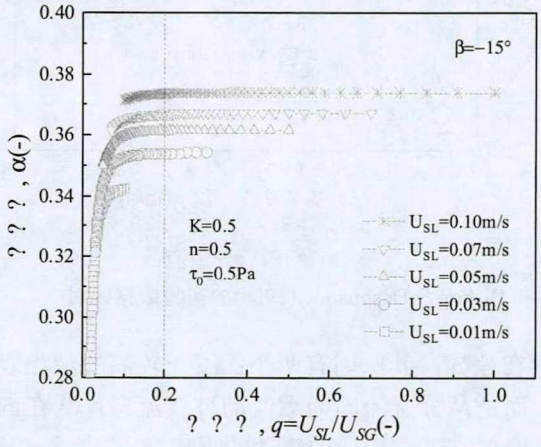


图 5 液相表观速度对持液率的影响

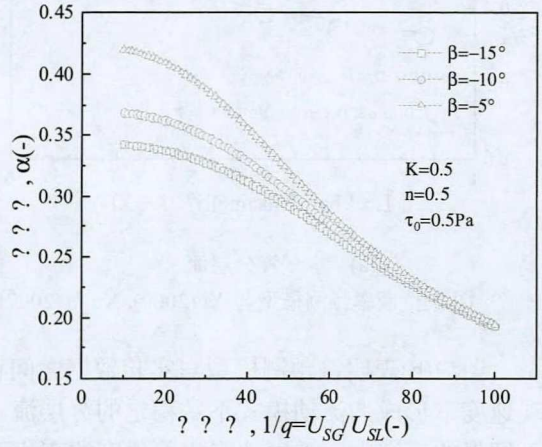


图 6 管道倾斜角度对持液率的影响

3.2 来流速度对分层流持液率的影响

在向下倾斜管流中，持液率 α 随着液相表观速度的增加而明显增加（图 5）。当表观液体速度固定且较低表观气相速度下，q 对持液率的影响可以忽略。当 q <0.2，即表示气相表观速度增加到液相表观速度的近 5 倍时，持液率才急剧下降。

3.3 管道条件对分层流持液率的影响

管道的几何形状直接影响气液两相流动，不同倾斜角度将形成不同的流型和流动特性。图 6 显示了两相速比和管道倾角对持液率的影响。可以看出，随着气液速度比 $1/q$ 的增加，持液率逐渐降低。如图所示随着 $1/q$ 的增加，持液率以幂指数的形式减小，最后达到一个较小的常数。

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

4 结论

本文基于赫歇尔-伯克利流体模型采用迭代计算进行气-液分层流动理论研究，以此探讨非牛顿流体本构关系对两相流动特性的影响。建立了用于预测管道中气-液流动的持液率的力学模型，并通过实验数据进行了验证。结果表明，流体物理性质，流动条件和管道倾角对气-液分层流的持液率有显著影响。值得注意的是，幂律指数 n 和屈服应力 τ_0 (表征液相的流变特性)对气-液两相分层管流的影响，剪切稀化特性和屈服特性的增强将导致持液率的增加。表观液相速度与两相分层管流的持液率存在正相关关系，在向下倾斜的两相分层管流中，随着角度的增加，持液率减小。

参考文献

1 Taitel Y, Dukler A E. A model for predicting flow regime transitions in horizontal and near horizontal gas-liquid flow[J]. Aiche Journal, 1976, 22.

2 Heywood, N. and Charles, M.E. The stratified flow of gas and non-Newtonian liquid in horizontal pipes[J]. Int. J. Multiphase Flow 1979, 5: 341-352.

3 Xu, J.-y., Wu, Y.-x., Li, H., Guo, J. and Chang, Y. Study of drag reduction by gas injection for power-law fluid flow in horizontal stratified and slug flow regimes[J]. Chem. Eng. J 2009, 147(2-3): 235-244.

4 Xu, J.-y., Wu, Y.-x., Shi, Z.-h., Lao, L.-y. and Li, D.-h. Studies on two-phase co-current air/non-Newtonian shear-thinning fluid flows in inclined smooth pipes[J]. Int. J. Multiphase Flow 2007, 33(9): 948-969.

5 Bishop A.A. and Deshpande S.D. Non-Newtonian liquid-air stratified flow through horizontal tubes-II, Int. J. Multiphase Flow 1986, 12: 977-996.

6 张德义，王为民，黄杰,等. 双流体模型在油气混输管线计算中的应用[C], 第十六届全国水动力学研讨会文集. 北京：海洋出版社, 2002: 775-780.

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

Evaluation of the liquid holdup in a stratified gas-liquid inclined pipeline according to the Herschel–Bulkley fluid model

HOU Lin-tong [1,2], LIU Shuo[2], ZAHNG Jian[2], WANG Li-song[1,2], XU Jing-yu[1,2]

(1. School of Engineering Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 2. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100190, China. Emial: xujingyu@imech.ac.cn)

Abstract: The theoretical models of gas-liquid flow based on Newtonian fluid, power-rate fluid and Bingham fluid cannot be accurately applied to the unconventional petroleum field. To this end, based on the Herschel-Berkeley fluid constitutive, with the help of the two-fluid theory and flow control equations, a prediction model of liquid holdup in a two-phase stratified pipe flow is derived. The effects of non-Newtonian fluid rheological parameters, flow conditions and pipe angle on the gas-liquid stratified flow of the Herschel-Berkeley fluid are comprehensively considered. The results show that non-Newtonian rheological characteristics (such as power law index and yield stress) have a significant effect on the liquid holdup in two-phase flow. The specific performance is that the enhancement of liquid yield and shear thinning characteristics will lead to an increase in liquid holdup. Comparing the experimental data, the liquid holdup calculation model shows a good prediction effect. The main feature of this prediction model is that even if the liquid has complex rheology or contains solid particles, it can also describe the two-phase stratified flow through the gas/non-Newtonian fluid behavior. This model provides new insights into the gas-liquid flow characteristics of complex fluids in inclined pipes.

Key words: Herschel-Bulkley fluid, gas-liquid stratified flow, liquid holdup, prediction model

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net