

文章编号: 1004-1338(2018)01-0008-06

水平及倾斜圆管中油水两相分层流界面波 对摩擦压降的影响

王强¹, 张宏兵¹, 潘益鑫¹, 凌燕¹, 刘兴斌², 李雷²

(1. 河海大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 210098;

2. 大庆油田股份有限公司测试技术服务分公司, 黑龙江 大庆 163153)

摘要: 油水两相流在重力和界面张力共同作用下发生分层, 由于剪切应力的作用, 在管道流动中产生摩擦压降, 油水两相分层流在流动参数改变时产生界面波, 其对摩擦压降产生影响。实验研究水平和倾斜管道油水两相波状分层流界面波特性及其对摩擦压降的影响, 并改进一维双流体模型预测摩擦压降。研究表明, 管道倾角增加时, 油水两相分层流界面波振幅增大, 其对摩擦压降的影响也随之增强, 改进的考虑界面波振幅的模型在不同管道倾角中的摩擦压降预测结果与实验数据吻合好。

关键词: 实验研究; 分层流; 倾斜管道; 摩擦压降; 界面波振幅; 油水两相流

中图分类号: P631.84 **文献标识码:** A

Doi: 10.16489/j.issn.1004-1338.2018.01.002

Effects of Interfacial Wave on Frictional Pressure Gradient of Oil-water Two-phase Stratified Flow in Horizontal and Inclined Pipes

WANG Qiang¹, ZHANG Hongbing¹, PAN Yixin¹, LING Yan¹, LIU Xingbin², LI Lei²

(1. Department of Earth Science and Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China;

2. Logging and Testing Services, CNPC Oilfield Company, Daqing, Heilongjiang 163153, China)

Abstract: Oil and water two phases forms the stratified flow due to the combined action of gravity and interfacial forces. The frictional pressure gradient generates in the pipeline due to the shear stress. The frictional pressure gradient is influenced by the interfacial wave due to the change of flow parameters. Studied are the characteristics of interfacial waves in oil-water two-phase wavy stratified flow at horizontal and inclined pipelines and the effect of interfacial wave on the frictional pressure gradient. The modified one dimensional two-fluid model is presented to predict the frictional pressure gradient. The results indicate that the interfacial wave amplitude increases as pipeline inclination increasing and the effect of wave amplitude on the frictional pressure gradient increases. A good agreement is observed of the frictional pressure gradient between predicted data obtained from the modified one-dimension two-fluid model and experimental results.

Keywords: laboratory research; stratified flow; inclined pipeline; frictional pressure gradient; interfacial wave; oil-water two-phase flow

0 引 言

分层流是水平和倾斜管道中两相流的基本流

型,而波状分层流由于界面发生波动而产生界面波增加流动的复杂性。油水两相流实验研究表明,油水两相流管道从水平变成倾斜时,油水两相分层流

基金项目: 国家科技重大专项“大型油气田及煤层气开发”子课题(2016ZX05019001-011),国家自然科学基金(41674113)

第一作者: 王强,男,1991年生,硕士研究生,主要从事多相流实验和数模研究。E-mail:1014157253@qq.com

达到的最大流速减小,油水界面变得更加起伏和不规则^[1-4]。水平管道波状分层流界面波振幅随着油水表观速度增加而增大,但随着油水入口含水率增大而减小;水相(油相)表观速度从小于油相(水相)表观速度增大至两者相等时,界面波长随之增大,而当水相表观速度从等于油相表观开始增大时界面波长减小^[5]。当管道从水平发生向下倾斜时,油水界面波振幅增大,波长减小,向上倾斜时则相反^[6]。

水平及倾斜管道油水两相分层流流型和压降数值模拟也得到了相应的研究结果。基于 Bond 数的油水界面形状研究揭示随着 Bond 数增大,油水界面趋于水平^[7-8]。在摩擦压降方面的数值模拟方法主要有均相流模型(homogeneous flow model)^[9-10]和双流体模型(two-fluid model)^[11-12]。Al-Wahabi^[13]利用均相流模型模拟了水平管道油水两相分层流压降,预测结果表明,油相和水相表观速度范围分别为 0.05~1.5 m/s 和 0.04~1.25 m/s,当油相黏度为 1~28 cP*,油水两相流在不同管道材质和管径(14~82.8 mm)的摩擦压降预测结果较为合理。Rodriguez 和 Baldani^[14]采用双流体模型预测了

水平和倾斜管道摩擦压降并与实验对比,吻合程度较均相流模型高。油水两相波状分层流在相同流量和含水率下随着管道倾角改变而发生界面波振幅改变,但现有文献包括实验和数值模拟研究没有考虑界面波对摩擦压降的影响。本文利用实验中测量得到的不同倾角中的界面波和压降,研究油水两相波状分层流界面波对摩擦压降的影响。

1 实验系统与数据采集

实验采用油水两相流进行水平和倾斜分层流流动测试,实验中油水两相总流量 Q_m 为 5~40 m³/d,含水率 C_w 为 0~100%,油相密度为 856 kg/m³,黏度为 11.98 mPa·s,水相密度为 998 kg/m³,黏度为 1.0 mPa·s,油水界面张力为 35 mN/m。实验系统由控制系统、循环管路和测量装置组成(见图 1)。实验管道为内径 20.0 mm 的有机玻璃管,测试段长度为 5.0 m。实验过程中通过控制系统设定管道倾角,给定油水两相混合流量以及含水率,由计算机和自动控制系统进行流动控制。油水两相分层流动特

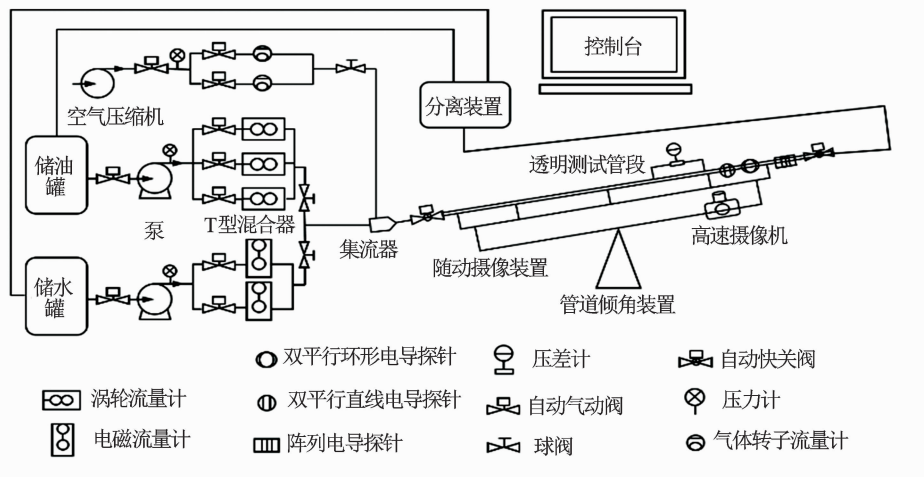


图 1 实验装置图

征采用高速摄像系统进行数据采集,试验测试段总压降使用差压计测量和记录,管道截面持油率利用快关阀技术进行采集得到。试验中使用的差压计为 Rosemount3051CD 型电容式压力变送器。该压力变送器总体性能指标为 $\pm 0.15\%$,精度为 $\pm 0.075\%$,差压量程为 0~13 800 kPa,绝对压力量程为 0~27 600 kPa。快关阀的工作原理:在通有两相流的实验管段两端安装 2 个快关阀门,正常情况下使这 2 个阀门处于常开状态,保持气液两相流的正常流动,当需要测量相含率时同时快速关断这 2 个阀门,

将流动的气液两相流体封存至实验管段内,然后通过分离气、液相介质计算获得实验管段内气液两相流的相含率。电磁快关阀的最高动作频率为 5 次/s,快关阀间距为 2 m。

高速摄像系统采用德国 HSVISION 公司的 MacroVis EoSens 高速相机,最短快门为 1 μ s,在 512 像素 \times 512 像素时拍摄速度为 5 000 FPS。试验开展了 4 种管道倾角 θ 分别为 0°、3°、5°和 10°的

* 非法定计量单位,1 cP=1 mPa·s,下同

油水两相分层流动特性研究。每次试验在流动稳定达到 5 min 后进行压降测量和流动特征图像采集以及截面持油率 ϵ 。测量,为消除系统和随机误差,每一流动重复 2 次试验。

2 试验结果与分析

2.1 波状分层流界面波振幅特性

实验中油水两相流量从小到大,每一流量下含水率 C_w 从 0 到 100% 进行实验并采集数据。图 2 为水平管道中油水两相流在不同流量及含水率下的分层流动特征图像。由图 2 可知,在流量较低时,油水界面在界面张力与重力共同作用下保持水平,为光滑分层流;当流量 $Q_m = 20 \text{ m}^3/\text{d}$ 时,湍流对两相流动的扰动增强而产生对称的油水界面波;随着流量的增大,界面波振幅增大。对比图 2(b)和图 2(c)可知,同一流量下不同含水率的界面波振幅变化不大。由于水平管道中重力在流动方向上的分量为 0,因此,在水平管道中重力起抵消产生界面波的扰动作用,即重力是界面波形成的阻力。

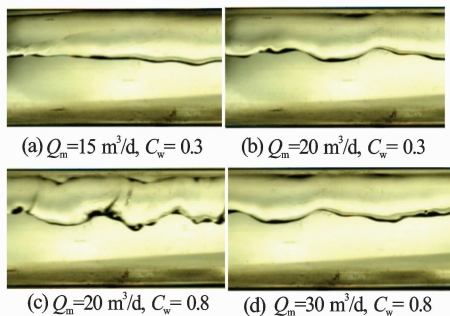


图 2 水平管道波状分层流

管道发生向上倾斜时,出现界面波的流量 Q_m 随之减小[见图 3(a)],管道倾角 $\theta = 3^\circ$ 时,出现界面波的流量下降至 $5 \text{ m}^3/\text{d}$,同时随着流量增加,界面波振幅增大。这是由于重力在流动负方向上产生分力,而重力分力成为产生界面波的动力,在 $\theta = 3^\circ$ 的管道中重力分力与湍流对产生界面波的作用在同一量级上。由图 3(c)和 3(d)可知,管道倾角 $\theta = 5^\circ$ 时,界面波振幅明显大于 $\theta = 3^\circ$ 中的振幅,这是由于重力分力随着管道倾角的增大而增大,其对界面波形成的作用力增大。油水界面波振幅在 $\theta = 5^\circ$ 管道中受流量和含水率的影响很小,这是由于管道倾角增大,增大后的重力分力对产生界面波的作用远大于湍流对界面波产生的影响,因此,由流量增加而增强的湍流在界面波形成中的作用相比重力分力可以

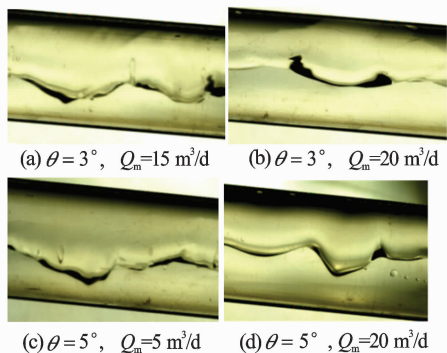


图 3 倾角 3° 与 5° 管道中 $C_w = 0.3$ 的波状分层流

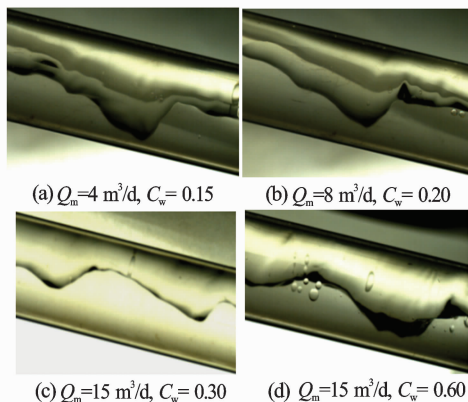


图 4 倾角 10° 管道波状分层流

忽略。

图 4 所示为油水两相分层流在 $\theta = 10^\circ$ 管道中波状分层流界面波特征图。 $\theta = 10^\circ$ 管道中分层流分布的流量 Q_m 为 $4 \sim 30 \text{ m}^3/\text{d}$ 。由图 4 可知, $\theta = 10^\circ$ 管道中的分层流都为波状分层流,不存在光滑分层流。界面波振幅在不同流量中基本相同,由此可知重力分力成为界面波形成的主要作用力。图 4(c)和 4(d)中,界面波振幅随着含水率的增大而减小,这是由于含水率增加导致油层变薄。在 $\theta = 10^\circ$ 管道中界面波非对称性进一步增强,波峰指向重力方向,这是由于重力分力具有单一方向性。对比其他倾角中的界面波可知,随着管道倾角增大,界面波振幅增大。

2.2 油水两相分层流摩擦压降

油水两相流动的总压降由摩擦压降、重力压降和加速压降组成,在常温流动中可以忽略加速压降。水平管道中由于重力垂直管道,因而摩擦压降即为总压降;当管道发生倾斜时摩擦压降为总压降与重力压降之差。水平及倾斜管道油水两相分层流摩擦压降与管道截面持油率 ϵ 。的关系见图 5。由图 5(a)可知,当 $Q_m = 5 \text{ m}^3/\text{d}$ 以及截面持油率 $\epsilon_c < 0.6$ 时,倾角 θ 分别为 $0^\circ, 3^\circ$ 和 5° 管道中的摩擦压降差值很小,随截面持油率 ϵ_c 增大发生小幅波动,在 $\epsilon_c >$

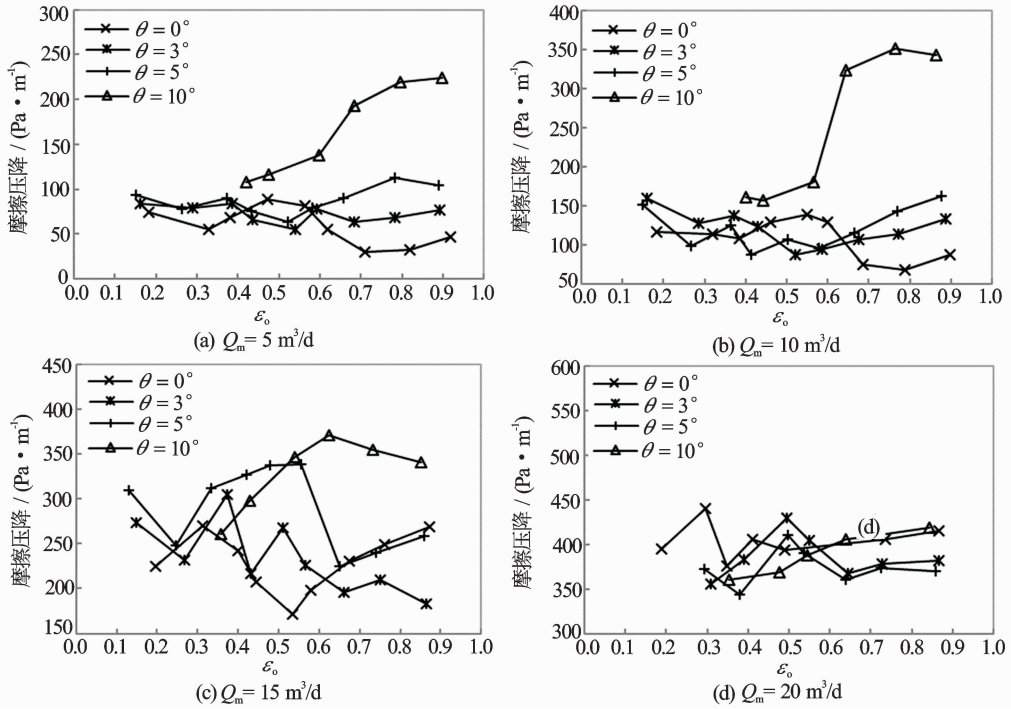


图 5 油水两相分层流的摩擦压降与截面持油率的关系

0.6 时,三者发生分离,摩擦压降随着管道倾角增加而增大;倾角 $\theta = 10^\circ$ 管道中的摩擦压降大于相同持油率下其他 3 种倾角管道中的压降,并且随着持油率增大,摩擦压降迅速增大。

由图 5(b) 可以看出,流量 Q_m 增加到 $10 \text{ m}^3/\text{d}$ 时,管道倾角 θ 分别为 0° 、 3° 和 5° 中的摩擦压降与截面持油率的关系与流量 $Q_m = 5 \text{ m}^3/\text{d}$ 时的关系相似,而倾角 $\theta = 10^\circ$ 管道中的摩擦压降在 $\epsilon_o > 0.6$ 时迅速增大,增加的幅度比流量 $Q_m = 5 \text{ m}^3/\text{d}$ 时更大。图 5(c) 为摩擦压降与截面持油率在流量 $Q_m = 15 \text{ m}^3/\text{d}$ 的相互关系,管道倾角 θ 分别为 0° 、 3° 和 5° 中的摩擦压降随着持油率增大而围绕一定值波动;同时,倾角 $\theta = 5^\circ$ 中的摩擦压降和波动幅度均比其他 2 个角度中的值大。管道倾角 $\theta = 10^\circ$ 的摩擦压降在持油率 $\epsilon_o > 0.6$ 时明显大于其他 3 个倾角管道的压降。

图 5(d) 显示了当流量增加到 $20 \text{ m}^3/\text{d}$ 时,所考察的 4 个倾角管道中的摩擦压降基本接近,随着截面持油率的变化而小幅波动。由此可知,随着流量的增大,摩擦压降受管道倾角影响减小。

2.3 界面波对摩擦压降影响分析

油相两相波状分层流摩擦压降的产生是由于流体存在剪切应力,而剪切应力由流速、管径、黏度、管壁粗糙度和两相接触面积等参数决定。由波状分层流界面波振幅特性和摩擦压降分析可知,保持流速

和界面持油率不变时,随着管道倾角增大,界面波振幅增大;流量 Q_m 分别为 5 、 $10 \text{ m}^3/\text{d}$ 时,管道倾角 $\theta = 10^\circ$ 的摩擦压降显著大于其他倾角的压降,并且持油率 $\epsilon_o > 0.6$ 时,管道倾角 θ 分别为 0° 、 3° 和 5° 的摩擦压降随着倾角增大而增大。与流量相对应的界面波振幅随着管道倾角增大而显著增大;随着持油率增大而增大。由此可知,油水两相波状分层流摩擦压降受到界面波振幅影响。

一维双流体模型被广泛用来预测油水两相分层流摩擦压降。油水两相分层流摩擦压降由 3 个部分组成,即油水界面、管壁与水、管壁与油之间的摩擦;分散流由 2 个部分组成,水包油分散流为管壁与水、油滴与水,油包水分散流为管壁与油、水滴与油。因此,不同流型对摩擦阻压降的影响不同,进而对其测量存在影响。模型方程^[12-13,15]

$$-A_w \frac{dp_f}{dz} - \tau_w S_w \pm \tau_i S_i = 0 \quad (1)$$

$$-A_o \frac{dp_f}{dz} - \tau_o S_o \mp \tau_i S_i = 0 \quad (2)$$

式中, A_w 、 A_o 分别为水相和油相管道截面面积, m^2 ; $\frac{dp_f}{dz}$ 为摩擦压降; τ_w 、 τ_o 和 τ_i 分别为水相和油相与管壁剪切应力、油水界面剪切应力, Pa ; S_w 、 S_o 和 S_i 分别为水相、油相的管壁湿润周长、油水界面长度, m 。

油水与管壁剪切应力用流体摩擦系数形式 f_w

和 f_o 给出

$$\tau_w = f_w \frac{\rho_w v_w^2}{8} \quad (3)$$

$$f_w = \begin{cases} \frac{64}{Re_w} & \text{层流} \\ \left(-1.8 \lg \left[\frac{6.9}{Re_w} + \left(\frac{\delta}{3.7D_w} \right)^{1.1} \right]\right)^{-2} & \text{湍流} \end{cases} \quad (4)$$

$$\tau_o = f_o \frac{\rho_o v_o^2}{8} \quad (5)$$

$$f_o = \begin{cases} \frac{64}{Re_o} & \text{层流} \\ \left(-1.8 \lg \left[\frac{6.9}{Re_o} + \left(\frac{\delta}{3.7D_o} \right)^{1.1} \right]\right)^{-2} & \text{湍流} \end{cases} \quad (6)$$

界面剪切应力为

$$\tau_i = f_i \frac{\rho_i (v_w - v_o)^2}{8}$$

$$f_i = \begin{cases} f_i = f_w; \rho_i = \rho_w & \text{当 } v_w > v_o \\ f_i = f_o; \rho_i = \rho_o & \text{当 } v_w < v_o \end{cases} \quad (7)$$

式中, f_i 为油水界面剪切应力摩擦系数; ρ_w 和 ρ_o 分别为水相和油相密度; ρ_i 为流速较快相的密度; D_w 和 D_o 分别为水相和油相的水力直径, m; v_o 、 v_w 分别为油相、水相速度, m/s。式(1)至式(7)参数由方程(8)给出

$$D_w = \frac{4A_w}{S_w + S_i}; \quad D_o = \frac{4A_o}{S_o} \quad \text{当 } v_w > v_o$$

$$D_o = \frac{4A_o}{S_o + S_i}; \quad D_w = \frac{4A_w}{S_w} \quad \text{当 } v_w < v_o \quad (8)$$

$$D_o = \frac{4A_o}{S_o}; \quad D_w = \frac{4A_w}{S_w} \quad \text{当 } v_w \approx v_o$$

$$S_i = D \left[1 - \left(2 \frac{h_w}{D} - 1 \right)^2 \right]^{0.5}$$

$$S_o = D \cos^{-1} \left(2 \frac{h_w}{D} - 1 \right) \quad (9)$$

$$S_w = \pi D - S_o$$

$$A = \frac{\pi}{4} D^2; \quad A_w = A - A_o \quad (10)$$

$$A_o = \frac{D}{4} \left[S_o - S_i \left(2 \frac{h_w}{D} - 1 \right) \right]$$

$$\epsilon_o = \frac{A_o}{A}; \quad \epsilon_w = \frac{A_w}{A} \quad (11)$$

$$v_o = \epsilon_o \frac{Q_m}{A}; \quad v_w = \epsilon_w \frac{Q_m}{A}$$

$$Re_o = \frac{\rho_o v_o D_o}{\mu_o}; \quad Re_w = \frac{\rho_w v_w D_w}{\mu_w} \quad (12)$$

式中, D 为管道直径, m; h_w 为油水界面高度, m; A

为管道截面面积, m^2 ; Q_m 为油水混合流量, m^3/d ; Re_o 、 Re_w 分别为油相、水相雷诺数。由式(1)至式(12)可以看出, 一维双流体模型的摩擦压降是关于混合流量和截面持油率的函数。本文实验中观察到界面波振幅随着管道倾角改变而变化, 摩擦压降在相同混合流量和截面持油率时与管道倾角存在较强的相关性, 因此, 一维双流体模型中的 S_i 参数需要考虑界面波导致的长度增加。本文通过实测界面波振幅采用线性回归分析给出修改 S_i 参数并进行不同倾角管道的摩擦压降进行数值计算, 采用平均绝对偏差百分比(AAPE)评价模型预测结果与实验数据的吻合程度。

油水界面长度 S_i 采用式(13)进行修正为考虑界面波振幅的油水界面长度 S'_i

$$S'_i = S_i \times \exp \left(\frac{0.123(\theta + 0.931)(\epsilon_o + 0.1)}{Q_m + 1.134} \right) \quad (13)$$

平均绝对偏差百分比 AAPE 为

$$AAPE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{\frac{dp_f}{dz}_{mod} - \frac{dp_f}{dz}_{exp}}{\frac{dp_f}{dz}_{exp}} \right| \right] \times 100 \quad (14)$$

式中, N 为对比数据数量; 下标 mod 和 exp 分别表示计算与实验数据。

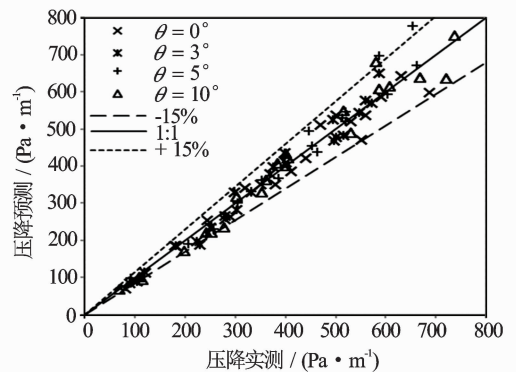


图6 摩擦压降预测结果与实验数据对比

图6为修改后模型对不同倾角管道摩擦压降预测结果与实验数据对比。预测结果与实验数据偏差范围在±15%, 管道倾角 θ 分别为 0° 、 3° 、 5° 和 10° 的最大偏差分别为 14.33%、18.19%、19.06% 和 17.34%, 而平均绝对偏差分别为 6.05%、6.91%、6.58% 和 7.15%。由此可知, 修改后的模型对油水两相波状分层流在不同倾角管道流动的模式压降预测结果与实验数据吻合较好。

3 结 论

(1) 油水两相分层流在重力、表面张力和湍流共同作用下产生界面波,在水平和 3° 上倾管道中,界面波振幅随着入口流量的增加而增大;在 5° 和 10° 上倾管道中界面波振幅随流量增加而变化微小,但随截面持油率降低而减小。随着管道倾角增加,其对界面波振幅的影响显著增大。

(2) 油水两相波状分层流摩擦压降随流量增加而增大;在中高持油率时,随着管道倾角增加,摩擦压降增大。流量较低时,摩擦压降受管道倾角影响显著,表明油水两相界面波振幅对摩擦压降的影响较大。

(3) 基于油水两相界面波振幅,利用实验数据回归分析对一维双流体模型油水界面长度参数进行改进,预测结果与实验数据吻合较好,表明考虑管道倾角和界面持油率对界面波振幅影响的改进模型能够更加精确地预测油水两相分层流摩擦压降。

参考文献:

- [1] ULLMANN A, ZAMIR M, GAT SBRAUNER N. Multi-holdups in Co-current Stratified Flow in Inclined Tubes [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2003, 29(10): 1565-1581.
- [2] LUM J Y L, LOVICK JANGELI P. Low Inclination Oil-water Flows [J]. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 2004, 82(2): 303-315.
- [3] LUM J Y L, AL-WAHAIBI TANGELI P. Upward and Downward Inclination Oil-water Flows [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2006, 32(4): 413-435.
- [4] KUMARA W A S, HALVORSEN B MMELAAEN M C. Single-beam Gamma Densitometry Measurements of Oil-water Flow in Horizontal and Slightly Inclined Pipes [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2010, 36(6): 467-480.
- [5] AL-WAHAIBI TANGELI P. Experimental Study on Interfacial Waves in Stratified Horizontal Oil-water Flow [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2011, 37(8): 930-940.
- [6] DE CASTRO M S, PEREIRA C C, DOS SANTOS J

- NRODRIGUEZ O M H. Geometrical and Kinematic Properties of Interfacial Waves in Stratified Oil-water Flow in Inclined Pipe [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2012, 37(0): 171-178.
- [7] NG T S, LAWRENCE C JHEWITT G F. Laminar Stratified Pipe Flow [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2002, 28(6): 963-996.
- [8] NG T S, LAWRENCE C JHEWITT G F. Interface Shapes for Two-phase Laminar Stratified Flow in a Circular Pipe [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2001, 27(7): 1301-1311.
- [9] XU J Y, LI D H, GUO J, et al. Investigations of Phase Inversion and Frictional Pressure Gradients in Upward and Downward Oil-water Flow in Vertical Pipes [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2010, 36(11-12): 930-939.
- [10] MUKHAIMER A, AL-SARKHI A, EL NAKLA M, et al. Pressure Drop and Flow Pattern of Oil-water Flow for Low Viscosity Oils; Role of Mixture Viscosity [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2015, 73: 90-96.
- [11] KHALEDI H A, SMITH I E, UNANDER T ENOSSEN J. Investigation of Two-phase Flow Pattern, Liquid Holdup and Pressure Drop in Viscous Oil-gas Flow [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2014, 67: 37-51.
- [12] EDMONYI-OTU L CANGELI P. Pressure Drop and Holdup Predictions in Horizontal Oil-water Flows for Curved and Wavy Interfaces [J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2015, 93: 55-65.
- [13] AL-WAHAIBI T. Pressure Gradient Correlation for Oil-water Separated Flow in Horizontal Pipes [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2012, 42: 196-203.
- [14] RODRIGUEZ O M, HBALDANI L S. Prediction of Pressure Gradient and Holdup in Wave Stratified Liquid-liquid Inclined Pipe Flow [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2012, 96-97: 140-151.
- [15] AL-WAHAIBI T, AL-WAHAIBI Y, AL-AJMI A, et al. Experimental Investigation on Flow Patterns and Pressure Gradient Through Two Pipe Diameters in Horizontal Oil-water Flows [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2014, 122: 266-273.

(收稿日期: 2017-09-01 本文编辑 余迎)