

DOI: 10.16076/j.cnki.cjhd.2019.06.012

水平圆管内油水两相分散混合液的流动特征*

吴奇霖¹, 张健²

(1. 中海石油(中国)有限公司深圳分公司, 深圳 518067, E-mail: zhangjian@imech.ac.cn;
2. 中国科学院力学研究所, 北京 100190)

摘要: 管道内油水两相分散流动中的压降受相含率、相分布和流速等参数的影响, 研究表明同一混合液流速条件下, 随体积含油率的增大, 压降呈现为先增加后减小的趋势, 在连续相的相转化点处压降达到峰值。该文结合均相流模型和非牛顿流体流动理论, 对管道内油水两相流动的压降进行分析, 结果显示已有混合液表观黏度预测模型计算得到的压降与实验值存在较大偏差。综合考虑管道流动中油水两相的相分布特征, 优化得到了油水分散混合液表观黏度的预测模型, 可应用于计算流动中的压降, 且精度均在 10% 以内, 为管道混输系统的设计, 以及两相分散流动理论的发展提供可靠的理论依据。

关键词: 油水混合液; 表观黏度; 管道流动; 压降预测

中图分类号: O359

文献标志码: A

Investigation on the characteristics of oil-water two-phase dispersed flow in horizontal pipes

WU Qi-lin¹, ZHANG Jian²

(1. CNOOC China Ltd. Shenzhen, Shenzhen 518067, China;
2. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: The pressure gradient of oil-water two-phase dispersed flow in pipe is affected by series of parameters included phase holdup, phase distribution and flow rate. The pressure gradient increases as the increasing of oil volume fraction firstly and decreases after the peak where the phase inversion happened. The prediction of pressure gradient was researched by combining the homogeneous flow model and the non-Newtonian fluid flow theory in this work. It is poor to calculate the pressure gradient by the existed apparent viscosity prediction models. And a series of new apparent viscosity prediction models was introduced which considers the characteristics of dispersed phase distribution. In conclusion, the given apparent viscosity prediction model can be used to calculate the pressure gradient of oil-water dispersed flow, which is with the accuracy of 10%. It is important to the design of the pipeline transportation system and the development of two-phase dispersed flow theory.

Key words: oil-water mixture; apparent viscosity; pipe flow; pressure gradient prediction

* 收稿日期: 2019-01-03(2019-06-17 修改稿)

基金项目: 国家自然科学基金(51509235)

作者简介: 吴奇霖(1981—), 男, 深圳人, 高级工程师。

通讯作者: 张健, E-mail: zhangjian@imech.ac.cn

Received: January 3, 2019 (Revised June 17, 2019)

Project supported by foundations: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51509235)

Biography: WU Qi-lin (1981—), Male, Senior Engineer.

Corresponding author: ZHANG Jian, E-mail: zhangjian@imech.ac.cn

引言

伴随海上石油资源的大规模开发, 多相管道混输技术日益得到工业界的重视, 其中油气水多相流在管道内的流动理论成为多相流体力学研究的热点之一。该技术能够简化平台及陆上井口的分离和处理设施, 使油井产出物无需分离, 直接经多相混输管道输送至陆地处理厂进行集中处理。与敷设多条单相管道分别输送分离后的原油、水和天然气相比, 可以降低管道及相应辅助设施的建设投资, 减少运行费用, 经济效益显著^[1]。近年来, 国内外学者尝试采用不同的手段来研究管道内多相流的流动规律, 并试图将其理论化和系统化。然而, 由于其流动的复杂性, 多数研究仍处于起步阶段^[2-3]。油气水多相流动的深入研究将有助于解决石油工业中许多急待解决的问题, 推动石油工业向前发展。

油水两相流动是混输技术中的重要研究内容之一, 其最终的目标是将研究成果应用于多相流管道等系统的设计中。由于油水混输过程中存在着乳化和相转化等特性(尤其是高黏原油-水的两相管道流动), 在不同的流动状况下, 即使流量基本保持不变, 管道压降和界面相含率也可能相差很大^[4-5]。另外, 含水原油在开采和集输过程中, 油相(或水相)常被分割成小液滴, 极容易形成油水两相均匀分散流动。但实际流动中的油水混合液与稳定的乳状液不同, 一般呈现为非稳定的状态。这种分散流动在原油集输过程中呈现的流动规律与单相流体不同, 且形成的分散体系一般表现为复杂的非牛顿流体的性质, 具有剪切变稀、增稠、触变性、黏弹性和屈服应力等流变学特性^[6-7], 故采用以往的均相流模型和单相流体力学的计算方法进行集输管网设计与实际情况偏差较大^[8]。

针对管道内油水分散混合液的流动, 国内外开展了大量的研究工作。Cengel等^[9]给出了水平管中非稳定的水包油型混合液在层流和湍流状态下的流动特征。研究中作者假设混合液的流动类似于单相流体的流动, 并作出以下三种假设: ①分散相均匀地分散于连续相中; ②两相之间没有相对滑移; ③所有的液滴小于湍流中的Kolmogoroff尺度; 给出了湍流流动下表观黏度的计算公式, 以此来计算管道流动中的压降等参数

$$\eta_m = \eta_c \times \left(\frac{0.079}{a \cdot Re_c^{0.25-b}} \right)^{0.25} \quad (1)$$

式中: η_m 为混合液的表现黏度; η_c 为连续相的黏度; a 和 b 为经验参数。

1987年, Pal^[10]对管道中稳定和非稳定油水乳状

液的流动特征进行研究, 得出以下三个结论: ①稳定的乳状液的流动, 其摩擦压降可以通过计算单相流压降的方法来计算; ②对于非稳定的乳状液, 在低速的条件下分散相较易于聚并, 只能在层流且流速较高的情况下以单相流计算摩擦压降的方法来计算混合液的摩擦压降; ③非稳定乳状液在湍流流动条件下, 存在明显的阻力减小现象, 因此, 采用单相流的公式来计算油水分散混合液的摩擦压降得出的值将明显大于实际流动中的摩擦压降。Lovick等^[11]对水平管中油水双连续的分散分层流动进行系统研究, 分别采用电感和电阻探针测试系统对流动中的相分布进行直接测量。实验结果表明, 这种流动状态下的摩擦压降几乎小于全部情况下单相油流动时的压降, 即出现了前面所述的减阻现象。且文献中指出, 油为连续相时, 出现的减阻现象明显强于水为连续相时出现的减阻现象。Ngan^[12]分别采用实验和CFD数值模拟对水平管道内油水分散流动的相转化及相应的摩擦压降特征进行研究, 得出相转化发生在一定的区域内, 并采用探针转化过程进行分析; 同时, 采用理论模型对相转化点和流动中的摩擦压降进行预测。

研究者针对油水两相分散管流开展了大量的研究, 且取得较好的成果, 但由于油水分散分布特征的复杂性, 流动中压降等参数的预测方法和精度仍存在的问题亟待解决。本文将通过室内实验测量油水两相分散流动中的相分布和压降等特征, 结合均相流模型对流动参数进行分析, 且综合考虑流动中的非稳态相分布的影响, 提高油水分散混合液表观黏度的预测精度, 进而精确计算流动中的压降等特征, 为管道运输系统的设计, 以及两相分散流动理论的发展提供可靠的理论依据。

1 实验装置和方法

为模拟原油开采输运中油水两相的相分布情况, 在实验测试段前增加静态混合装置, 以此达到油水两相分散分布状态。实验循环流程如图1所示, 循环管道的长度为20 m, 为观测流动中的相分布情况, 实验管道采用透明有机玻璃材质。为了研究尺寸效应的影响, 以及不同尺寸管道内流动特征的变化规律, 选用工业应用和室内实验常用的两种尺寸的管道进行室内实验测试和分析, 管道内径分别为25 mm和50 mm。油水两相分别由各自的供应系统进入管道, 然后进入管道静态混合器, 经过搅拌后进入测试段。管道式静态混合器, 其混合过程是由固定在管内的混合单元进行, 由于混合单元的作用, 使流动介质产生不同方向的旋转流动, 不仅将管道中心的介质推向周边, 而且将周边的介质推向中心, 进而造成良好的混合效果。实验采用的油相为白油,

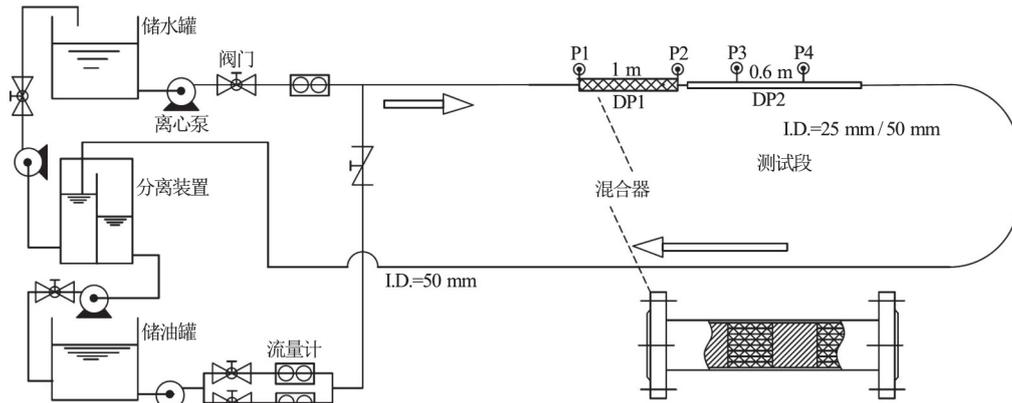


图1 实验循环流程示意图

Fig.1 Schematic diagram of the experimental cycle

水相为生活用水，具体的物性参数如表1所示。实验测试中，油相的表观流速为0-1.2 m/s、水相的表观流速为0-1.5 m/s，体积含油率范围为0-1，混合液流动中的 Re_m 范围为 10^2 - 10^5 。

表1 流动介质物性参数

($T=20\text{ }^\circ\text{C}$, $P=0.1\text{ MPa}$)

Table 1. Physical characteristics of experimental fluids

($T=20\text{ }^\circ\text{C}$, $P=0.1\text{ MPa}$)

	密度 $\rho / \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	黏度 $\eta / \text{mPa} \cdot \text{s}$
白油	860	46
水	998	1

实验中，按照预设的水相和油相表观流速进行测试，分别调节管道入口油相和水相供应系统的变频控制器和阀门，待流动稳定后，依次采集流动中的相分布和压力等参数。压力采集系统包括：压力和压差传感器、信号采集卡、采集软件。信号采集卡，采用Quatech系列的PCMCIA卡及采集速率921.6 kbps；压力信号分别采用Honeywell 40PC表压传感器和26PC差压传感器进行，测量精度均为0.15%。同时，采用高速摄像机实时监测流动中的相分布情况，特别是水为连续相和油为连续相转化时的相分布。

2 结果分析

2.1 流动中的压降特征

图2为同一混合速度下，压降 (dp/dl) 随含油率 (ϵ_o) 的变化规律，可以看出压降随着含油率的增加，均表现为先增加后减小的特征，且在含油率为0.8-0.9的区间内达到峰值，远高于纯油流动时的压降，且管道内径分别为25 mm和50 mm的实验结果表现出相同的规律。同时，通过油水两相的分布特征得出，当含油率低于此区间，混合液中水为连续相，当含油率高于此区间时，混合液中油为连续相，即油水两相流动在此处发生了连续相相转化。

该结果可通过前期油水分散混合液表观黏度的研究成果进行分析^[13]，即油水两相分散混合液在连续相转化点处，表观黏度达到峰值，进而导致在管道流动过程中，摩擦压降出现峰值。图3为水平管道内油水两相分散流动的摩擦压降 (dp/dl) 随混合速度 (U_m) 的变化规律，管道的内径分别为25 mm和50 mm两种条件下，均呈现为上凸曲线的变化趋势。

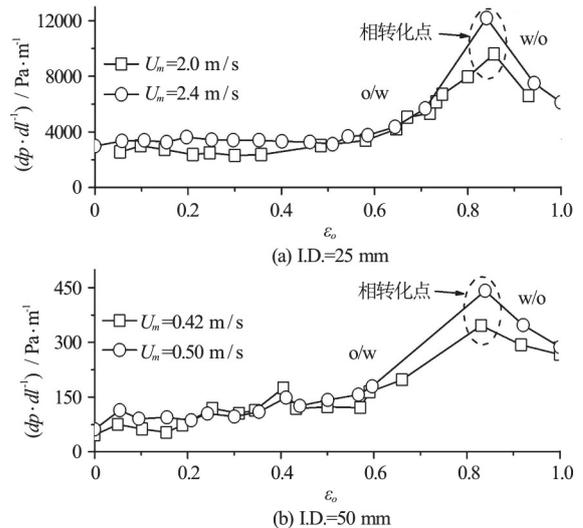


图2 管道流动中压降随含油率的变化规律

Fig.2 The changing behavior of pressure drop with the different oil volume fraction in pipeline flow

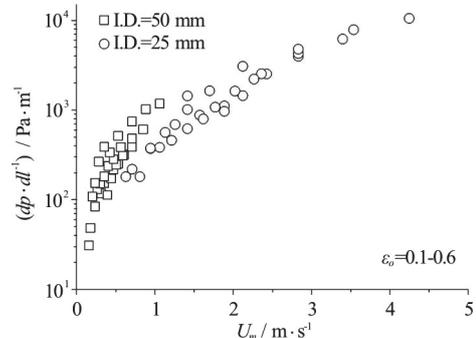


图3 管道流动中压降随混合速度的变化规律

Fig.3 The changing behavior of pressure drop with the different velocity in pipeline flow

2.2 流动参数分析

研究中, 根据流动过程油水两相的相分布情况, 采用均相流模型对实验测得的数据进行分析, 得到相应油水分散体系的表观黏度等特征, 其管道中的压降采用下式进行计算

$$\frac{dp}{dl} = f(Re_m, k/D, u_w - u_o) \cdot \frac{2\rho_m u_m^2}{D} \quad (2)$$

$$\rho_m = \rho_w(1 - \varepsilon_o) + \rho_o \varepsilon_o \quad (3)$$

$$Re_m = \frac{\rho_m u_m D}{\mu_m} \quad (4)$$

式中: f 为管道流动的摩擦因子; Re_m 为流动中的混合雷诺数; k 为管道壁面粗糙度, 单位: m ; ρ_m 为油水混合液密度, 单位: kg/m^3 。对光滑圆管内的流动, 壁面粗糙度为零, 且油水两相分散流动中不考虑两相间的速率滑移, 因此, 摩擦因子常采用下述方法进行计算

层流流动, $Re < 2300$, 采用Poiseuille关系式

$$f = \frac{16}{Re_m} \quad (5)$$

湍流流动, $Re \geq 2300$, 采用Blasius关系式

$$f = 0.079(Re_m)^{-0.25} \quad (6)$$

图4为管道流动中的摩擦因子 f 与 Re_m 间的对应关系, 其中, 摩擦因子 f 根据公式(2), 由实验测量得到的压降 (dp/dl) 、管道的内径 (D) 、流动中混合液的流速 (u_m) 和密度 (ρ_m) 计算得出; Re_m 中表观黏度分别采用具有代表性的幂律形式(式(7), Brinkman^[14])和指数形式(式(8), Pal^[15])的表观黏度模型计算得出, 图中的实线为根据Poiseuille(层流)和Blasius(湍流)关系给出的理论计算摩擦因子。

$$\eta_r = (1 - \phi)^{-2.5} \quad (7)$$

$$\eta_r \left[\frac{2\eta_r + 5K}{2 + 5K} \right]^{1.5} = \exp\left(\frac{2.5\phi}{1 - \phi/\phi_m}\right) \quad (8)$$

式中: $\eta_r = \eta_m/\eta_c$, 为相对黏度; ϕ 为分散相体积相含率; ϕ_m 为分散相最大体积浓度。

图4可以看出, 模型在大部分区域内得到的摩擦因子预测值均低于实际的测量值, 且对层流和湍流间转换区间的预测存在一定的误差。图5为对应

的预测精度, 其中 $(dp/dl)_E$ 为实验值, $(dp/dl)_M$ 为计算值, 预测的误差 θ 采用式(9)进行计算。

$$\theta = \left| \frac{(dp/dl)_M - (dp/dl)_E}{(dp/dl)_E} \right| \quad (9)$$

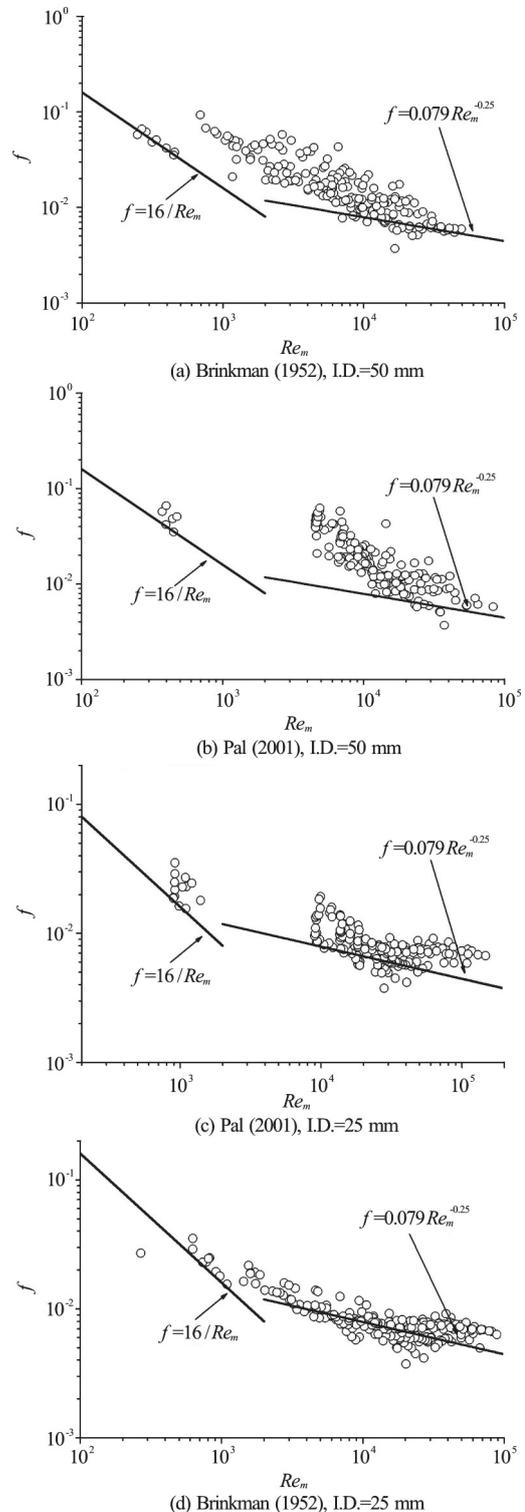


图4 摩擦因子与表观黏度模型计算得到 Re_m 间的关系
Fig.4 The relation between the frictional factor and Re_m calculated from the apparent viscosity models

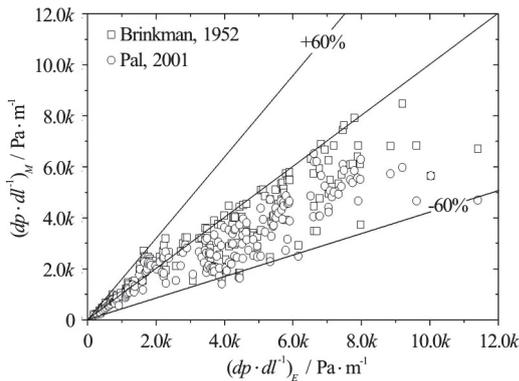


图5 管道内油水两相分散流动中压降预测精度
Fig.5 The prediction accuracy of the pressure gradient in oil-water dispersed pipeline flow

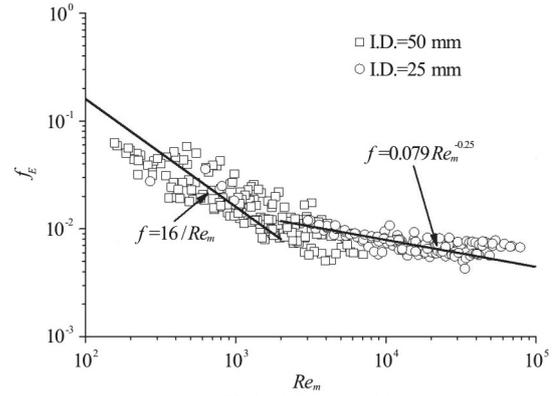
综上所述，文献中已有的表观黏度预测模型不能够很好地应用于管道流动中特征参数的计算，结合前期的研究成果^[16]，其主要原因是管道流动中，油水混合液呈现为非稳定的状态，且表现为不同程度的非牛顿流体的性质，影响了表观黏度的计算精度。

2.3 管道流动中压降预测

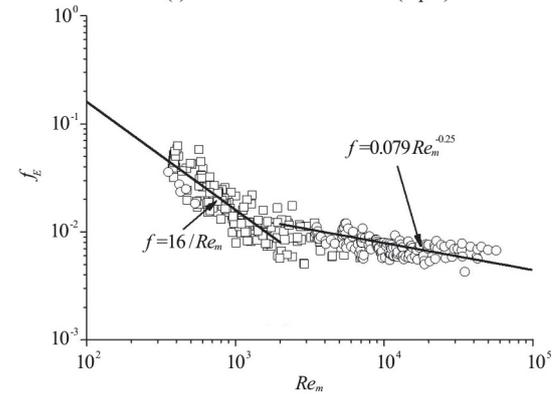
根据上述研究得出，由于流动中油水分散混合液的非稳态和非牛顿流体的特性，采用已有的表观黏度预测模型对其黏度进行预测，并应用于流动中压降的计算，结果存在较大的偏差。本文为进一步分析管道内油水两相分散混合液流动的压降特征，结合前期非稳态油水分散混合液流变学特性的研究成果^[15]，综合考虑油水分散混合液的稳定性和非牛顿流体的特性，对已有的表观黏度模型进行修订，提高预测的精度。

图6采用上述给出的表观黏度模型对流动中摩擦因子进行预测的结果。从图中可以看出，研究获得的表观黏度预测模型，可以应用于计算流动中的混合雷诺数，进而采用单相流中的层流和湍流理论计算得到流动中的摩擦因子和压降，且具有较高的精度。图7为管道内油水两相分散混合液流动中，压降预测值与实验测量值的对比情况。从图中可以看出，综合考虑油水分散混合液的稳定性和非牛顿流体的特性，修正得到的表观黏度预测模型，可以精确应用于预测管道流动中摩擦的压降，并采用式(9)对预测的误差进行计算，预测精度均在10%以内，满足油水混输系统等设备设计中压降的预测。

前期研究中，通过不同稳定性油水分散混合液流变学特性的对比分析，得出分散相的粒径分布是影响表观黏度的重要因素之一，对混合液的稳定性和非牛顿特性均产生直接的影响，但已有的表观黏度模型中鲜有考虑。因此，在已有表观黏度模型的基础上，综合考虑了分散相粒径分布对油水混合液表观黏度的影响，具体的影响规律如下所示

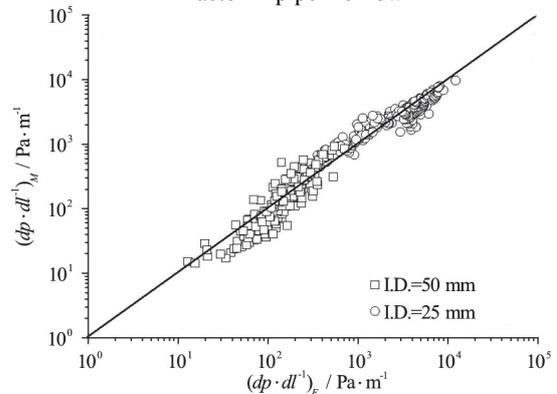


(a) Modified Brinkman Model (Eq.11)

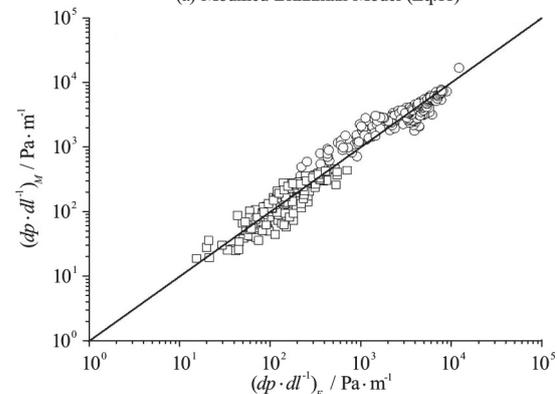


(b) Modified Pal Model (Eq.12)

图6 管道流动中摩擦因子预测值结果
Fig.6 The prediction consequence of the frictional factor in pipeline flow



(a) Modified Brinkman Model (Eq.11)



(b) Modified Pal Model (Eq.12)

图7 油水两相压降预测结果对比
Fig.7 The comparison of the predicted and experimental values of the pressure drop in oil-water dispersed flow

$$\eta_r \propto \left(\frac{\eta_d}{\eta_c}\right)^h \quad (10)$$

式中: η_d 和 η_c 分别为混合液中分散相和连续相的黏度; h 为指数参数, 反映油水乳状液中两相的相分布情况, 若混合液为完全稳定的乳状液, 则参数 $h=0$ 。

结合上述成果, 对Brinkman^[14]和Pal^[15]的表观黏度模型进行修正, 综合考虑油水分散混合液的稳定性和非牛顿流体的特征, 引入粒径参数 h 的影响

$$\eta_r = (1 - \phi)^{-2.5} * \left(\frac{\eta_d}{\eta_c}\right)^h \quad (11)$$

$$\eta_r \left[\frac{2\eta_r + 5K}{2 + 5K}\right]^{1.5} = \exp\left(\frac{2.5\phi}{1 - \phi / \phi_m}\right) * \left(\frac{\eta_d}{\eta_c}\right)^h \quad (12)$$

3 结论

油水两相分散混合液的流动, 广泛存在于石油资源的开采和输运中, 且流动中的压降等特征是输运和生产系统设计的重要参数。本文通过室内实验建立管道内油水两相流动的模拟系统, 对油水两相分散流动中的压降等特征进行直接测量, 得到了流动中压降的变化规律。同一混合液流速条件, 随着体积含油率的增大, 压降呈现为先增加后减小的趋势, 且在连续相的相转化点处, 压降达到峰值。

结合均相流模型和非牛顿流体流动理论, 对管道内油水两相流动的压降进行预测, 已有油水混合液表观黏度预测模型计算得到的压降与实验结果存在较大的偏差, 不能满足油水两相输运等系统的设计。因此, 综合考虑管道流动中分散相的分布情况, 优化得到了油水分散混合液表观黏度的预测模型, 可应用于计算流动中的压降, 且精度均在10%以内, 为管道混输系统的设计, 以及两相分散流动理论的发展提供可靠的理论依据。

参 考 文 献:

- [1] YANG L, LIU S, LI H, et al. Gas-liquid flow splitting in T-junction with inclined lateral arm[J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2018, 30(1): 173-176.
- [2] LI D H, XU J. Measurement of an oil-water flow via the correlation of turbine flow meter, gamma ray densitometry and drift-flux model[J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2015, 27(4): 548-555.

- [3] GUO J X, YANG Y Q, ZAHNG S, et al. Heavy oil-water flow patterns in a small diameter vertical pipe under high temperature /pressure conditions[J]. *Journal of Petroleum Science & Engineering*, 2018, 171: 1350-1365.
- [4] ABUBAKAR A, AL-WAHAIBI T, AL-HASHMI A R, et al. Effect of pipe inclination on holdups/velocity ratios of oil-water flow without and with addition of drag reducing polymer[J]. *International Journal of Multiphase flow*, 2017, 89: 359-374.
- [5] PIROOZIAN A, HEMMATI M, ISMAIL I, et al. An experimental study of flow patterns pertinent to waxy crude oil-water two-phase flows[J]. *Chemical Engineering Science*, 2017, 164(8): 313-332.
- [6] 陈小平, 许晶禹. 稠油动力黏度预测研究[J]. *水动力学研究与进展(A 辑)*, 2017, 32(1): 11-18.
CHEN Xiao-ping, XU Jing-yu. Prediction of dynamic viscosity of heavy crude oil[J]. *Chinese Journal of Hydrodynamics*, 2017, 32(1): 11-18.
- [7] 张栋, 张健, 刘硕, 等. 超稠原油的流变学特性及流动特征研究[J]. *水动力学研究与进展(A 辑)*, 2016, 31(2): 145-150.
ZHANG Dong, ZHANG Jian, LIU Shuo, et al. Investigation on rheological properties and flow characteristics of heavy crude oils[J]. *Chinese Journal of Hydrodynamics*, 2016, 31(2): 145-150.
- [8] 朱克勤. 非牛顿流体力学研究的若干进展[J]. *力学与实践*, 2006, 28(4): 1-8.
ZHU Ke-qin. Some advances in non-Newtonian fluid mechanics[J]. *Mechanics in Engineering*, 2006, 28(4): 1-8.
- [9] CENGEL J A, FARUQUI A A, FINNIGAN J W, et al. Laminar and turbulent flow of unstable liquid-liquid emulsions[J]. *AIChE Journal*, 1962, 8(3): 335-339.
- [10] PAL R, RHODES E. Viscosity concentration relationships for emulsions[J]. *Journal of Rheology*, 1989, 33(5-8): 1021-1045.
- [11] LOVICK J, ANGELI P. Experimental studies on the dual continuous flow pattern in oil-water flows[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2004, 30: 139-157.
- [12] NGAN K H, IOANNOU K, RHYNE L D, et al. A methodology for predicting phase inversion during liquid-liquid dispersed pipeline flow[J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2009, 87(3): 318-324.
- [13] ZHANG J, XU J Y, GAO M C, et al. Apparent viscosity of oil-water (coarse) emulsion and its rheological

- characterization during the phase inversion region[J]. *Journal of Dispersion Science and Technology*, 2013, 34(8): 1148-1160.
- [14] BRINKMAN H C. The viscosity of concentrated suspensions and solutions[J]. *Journal of Chemical Physics*, 1952, 20(4): 571.
- [15] PAL R. Novel viscosity equations for emulsions of two immiscible liquids[J]. *Journal of Rheology*, 2001, 45(2): 509-520.
- [16] 吴奇霖, 张健, 许晶禹. 粗油水乳状液的流变特性[J]. *油气储运*, 2014, 33(5): 531-537.
- WU Qi-lin, ZHANG Jian, XU Jing-yu. Rheological properties of coarse oil-water emulsions[J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2014, 33(5): 531-537.