

DOI: 10.3969/j.issn1000-4874.2012.06.015

超稠油水在倾斜管路中两相流动的研究*

刘海飞^{1,3}, 黄三平², 许晶禹¹, 邓晓辉², 罗东红², 张健¹

(1. 中国科学院力学研究所, 北京 100190, Email: liuhaifei1024@gmail.com;

2. 中国海洋石油总公司深圳分公司, 深圳 518067;

3. 总装备部工程设计研究总院, 北京 100028)

摘要: 通过实验研究了超稠油(在 20°C 下, 密度为 860 kg/m³, 黏度为 1680 mPa·s)、水两相在 45° 倾斜管中流动的流型和两相压降变化规律。倾斜实验段管线由内径 50 mm 的透明有机玻璃管组成, 向上倾斜管段长为 4.5 m。通过实验给出了不同入口条件下实验管段的流型图和两相压降图。结果表明: 超稠油水两相在管道中流动流型与低黏度比下的流型具有一定的差异, 特别在低入口水相流量下, 管道内出现了壁面附着一层油膜而管内部为油水相互掺混流动的流型; 油水两相压降随着入口含油率的增加而增加, 但在较高入口含油率区域, 两相压降出现了一个峰值和峰谷的演变过程。

关键词: 油水两相流动; 倾斜管; 超稠油; 流型; 压降

中图分类号: O359+.1

文献标识码: A

Experimental study for high-viscosity-ratio oil-water two-phase flow in inclined pipes

LIU Hai-fei^{1,2}, HUANG San-ping³, XU Jing-yu¹,
DENG Xiao-hui³, LUO Dong-hong³, ZHANG Jian¹

(1. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. Shenzhen Branch Company, China National Offshore Oil Corporation, Shenzhen 518067, China;

3. Center for Engineering Design and Research under the Headquarter of General Equipment, Beijing 100028, China)

Abstract: This work presents experimental studies on flow pattern and pressure drop of high-viscosity-ratio oil-water two-phase flow (oil-to-water viscosity ratio of about 1680:1 at 20°C). The test pipelines, the diameter of which is 50 mm, are

* **收稿日期:** 2012-06-01(2012-09-24 修改稿)

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划, SS2012AA090308-07)

作者简介: 刘海飞(1982-), 男, 江西上饶人, 博士.

通信作者: 许晶禹, E-mail: xujingyu@imech.ac.cn

Received: June 1, 2012 (Revised September 24, 2012)

Project supported by foundation: Supported by the National High Technology Research and Development Program of China (863 Program, SS2012AA090308-07)

Biography: LIU Hai-fei (1982-), Male, Ph. D.

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

made of transparent Perspex pipes to enable the visual observation of the oil-water flow pattern and the length of inclined pipes is 4.5 m. The oil-water two-phase flow pattern and pressure drop graphs were obtained from experimental data. The results indicate that the flow pattern of high-viscosity-ratio oil-water flow in inclined pipes presents different flow characteristics comparing with the low-viscosity-ratio oil-water flow, especially when the inlet water flux is low, a new flow pattern described as oil film at the pipe wall and inner dispersion of oil in water was observed; the oil-water pressure drops increase with increasing the inlet oil fraction, and in those high inlet oil fraction area the pressure drops appears a peak-valley relationship.

Key words: oil-water two-phase flow; inclined pipe; high-viscosity oil; flow pattern; pressure drop

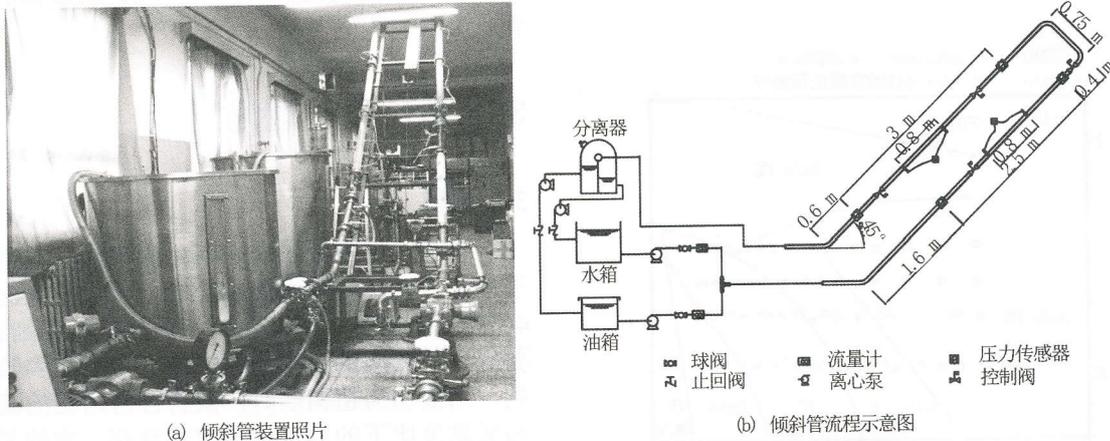


图1 倾斜管实验装置

Fig.1. Experimental setup of a inclined pipe

1 引言

对于两相或多相介质在管道中流动特性的研究,通常集中于研究相对简单的水平流动和垂直到动两种典型情况,而对于倾斜管道中两相或多相流动方面的研究开展较少。然而,在实际生产中,特别是在石油工业中的油气集输方面,倾斜管道的地位显得越来越突出和重要,陆地输油管线翻越山丘和穿越江河湖泊,以及海上集输管线从海底生产井口到油井平台或从海上平台向上倾斜延伸到海岸,这些都涉及到了倾斜管道中的多相流动问题^[1]。由于我国油田所产出的原油特性大多为高黏易凝原油,因此开展倾斜管道中超稠油水两相流动特性的研究,从而得到具有实际工程应用价值的理论和实验分析结果,已成为我国石油工业中多相流动研究领域的重要课题和迫切需要解决的问题。

通过对国内外学者已开展的倾斜管中油水两相流动研究工作的回顾^[2-15]可知,迄今为止,对于油水两相倾斜管流动的研究主要集中在油水两相黏度比小于10的情况,而较高黏度比下的研究则非常少。Kurban等^[8]在小倾斜角度下实验研究了油水两相(油水黏度比为45:1)在管道中的流动形态。Flores等^[9]研究了油水黏度比为20:1时两相流型和倾斜角度对管道内的相含率和两相压降的变化规

律。近期,Grassi等^[14]报道了高黏度比下(油水黏度比为800:1)油水两相在水平管内和小角度倾斜管内的流动研究。Grassi等^[14]通过研究发现,高黏度比的油水两相流动较容易形成水相在外围而油相在中间的环状流,并且在一定条件下的水平管道中观察到管道壁面附着一层油膜而管道内部为水包油的流型,但是在倾斜管中却未发现此流型,又采用Brauner提出的双流体模型和均相流模型分别对高黏度比下的环状流和水包油流型两相压降进行了预测,其结果与实验值吻合较好,并且发现均相流有效黏度的计算公式对压降预测结果无明显的影响。综上所述,目前对于倾斜管中超稠油水两相流动的研究工作开展得较少,无论是在两相流动流型上,还是在两相流动压降变化规律上都缺乏足够的实验数据和理论分析。因此,本文通过实验对超稠油水两相在倾斜管中的流动形态和两相压降规律进行较为系统的研究。

2 实验装置和实验过程

本实验工作是在中国科学院力学研究所多相流实验室的倾斜管道实验平台上完成的。图1为倾斜管道实验装置照片和实验系统流程图。实验中:用于储存油相和水相的罐体体积均为 1 m^3 ,混合分离罐由两个 1 m^3 罐体连接组成;整个流程主管路系

统由内径为 50 mm 的圆管组成, 上升和下降两组管路分别长为 4.5 m, 跨度为 0.75 m, 其中倾斜实验段由透明有机玻璃管组成, 以便于实验中对油水两相流动状态的观察和记录; 实验架的角度 (即管道倾角) 可在 $0^{\circ} \sim 45^{\circ}$ 之间调整, 在本实验中选定管道倾角为 45° ; 油、水两相分别由各自的供应系统 (油泵和水泵) 流出, 经过流量计后通过 T 型三通混合后进入实验管路, 最终流到混合分离罐进行分离后再循环使用。

度 860 kg/m^3 , 黏度 $1680 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ 。在实验条件下, 从测得的剪切速率和剪切应力关系中可知, 白油表现为牛顿流体特性。在实验过程中, 给定水相流量后, 调整油相流量, 通过有机玻璃管路实验段观察管内油水两相流型, 并通过高速摄像机进行拍摄, 经录像回放确定不同流型, 同时对实验管段进行压力信号的采集。实验各相表观流速的变化范围为: 水相 $0 \text{ m/s} \sim 0.5 \text{ m/s}$, 油相 $0 \text{ m/s} \sim 1 \text{ m/s}$ 。实验中针对不同的油、水流量比, 共完成了 89 组数据的采集工作。

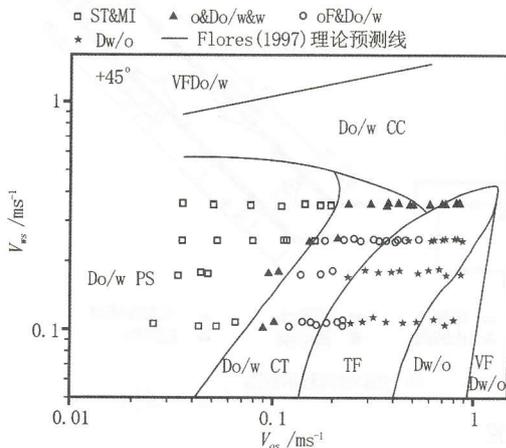


图 2 倾斜管内超稠油水两相流型图 ($+45^{\circ}$)
Fig.2. High-viscosity-oil/water flow patterns of inclined pipe ($+45^{\circ}$)

实验液相介质分别为自来水和白油, 实验介质温度控制在 $19^{\circ} \sim 21^{\circ}\text{C}$ 。 20°C 下水相的物性参数为: 密度 998 kg/m^3 , 黏度 $1.005 \text{ mPa}\cdot\text{s}$; 实验白油为无色、透明的矿物油, 20°C 下油相的物性参数为: 密

3 实验结果与讨论

3.1 流型

目前, 对于倾斜管中两相流型的研究主要集中在低黏度比下的油水两相流动, 例如 Flores 等^[9]对 45° 向上倾斜管中的油水两相流型进行了细致划分, 并提出了相应的流型预测模型。在本文实验中观察到, 当油相为超稠油时, 倾斜管内两相的流动结构与低黏度比下的油水两相流动存在一定的差异, 这主要是因为当油相黏度非常高时, 流动过程中油相会偏向聚集在管道上方, 并且黏附在管壁上, 而且当油相含率达到一定值后, 倾斜管内壁面会出现了一层油膜, 附着在管道壁面上, 并随着管内部流体的流动缓慢地向前推移。因此, 在实验观察的基础上, 本文将倾斜管中超稠油水两相流动的流型划分为: ① 相界面带有波动的混合层 (ST&MI); ② 上部为油层, 下部为水层, 中间为水包油的混合层 (o&Do/w&w); ③ 管道壁面附着一层油膜, 中间

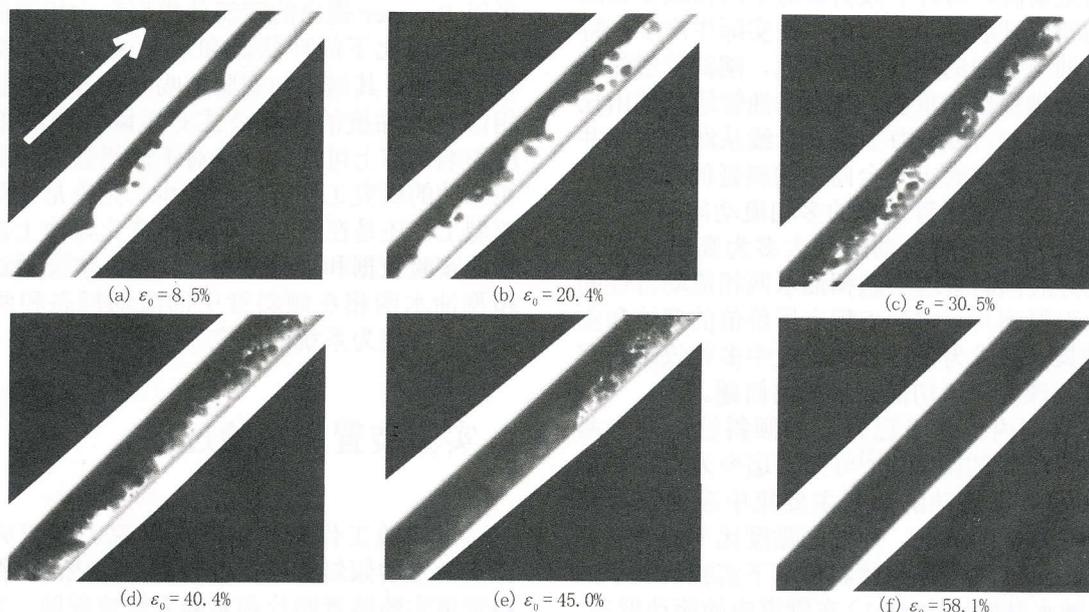


图 3 $+45^{\circ}$ 倾斜管内油水两相流型照片 (水相入口流量 $Q_w = 1 \text{ m}^3/\text{h}$)
Fig.3. Oil-water flow pattern pictures of $+45^{\circ}$ inclined pipe (the input water flux $Q_w = 1 \text{ m}^3/\text{h}$)

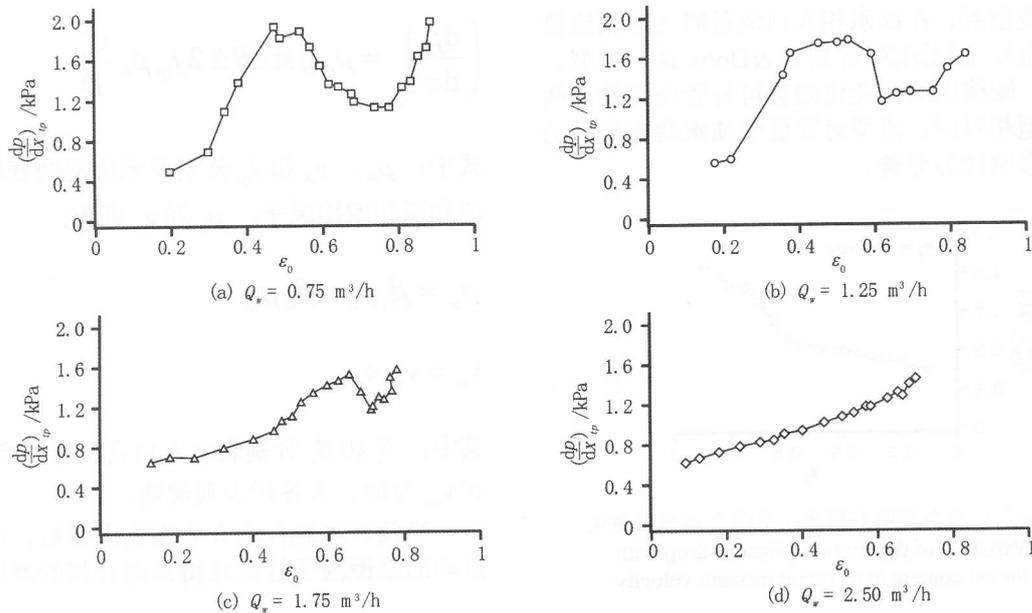


图4 不同水相流量下上升管摩擦压降随含油率的变化 (+45°)

Fig.4. Variation of friction pressure-drop with the oil content at different input water flux (+45°)

为水包油 (oF&Do/w); ④ 油包水 (Dw/o)。

图2给出了倾斜角度为+45°的油水两相管流流型图, Flores等^[9]对于45°向上倾斜油水两相流动的流型转化模型预测的流型分界线也在该流型图中表示出来。从图中流型比较中可以看出, 在本实验中没有观察到油水反向流动, 而且Flores的模型不能准确预测超稠油下倾斜管中油水两相流动的流型。

图3为实验中用高速摄像机拍摄的流型照片。观察流型时固定水相入口流量为1 m³/h, 然后逐渐增大入口油相流量, 即逐渐增大入口含油率。由图可知: 当入口含油率为8.5%时, 向上倾斜管中油水两相分层流动, 两相中间界面呈波浪状, 并且在界面上出现较少数的油滴翻滚前行, 此时的流型为S或ST&MI; 随着入口油相流量的增加, 两相界面波动幅度变大, 相界面上的油滴颗粒增多, 颗粒的粒径也逐渐变小; 当入口含油率为40.4%时, 在向上倾斜管中, 一部分的油相聚集在管道上部流动, 一部分的水相在管道下部流动, 而管道中间则为油掺混在水中向上流动, 此时的流型为o&Do/w&w; 当入口含油率增大到45.0%时, 向上倾斜管中的管道壁面上附着了一层油膜, 并且油膜随着液相介质缓慢地向前移动, 此时在管道截面上表现为外部油膜、内部水包油的流动形态, 即流型为oF&Do/w; 此后, 继续增大入口含油率, 由于管壁油膜的存在较难分辨管道内部的油水流动流型, 而在入口含油率提高到58.1%时, 由于管道壁面的纯油膜被破坏, 在管道壁面上可观察到水珠, 故可认为此时的流型为油包水流型, 即流型为Dw/o。实验中发现, oF&Do/w流型仅存在于水相入口流量较低的条件, 当把水相入口流量增大到2.5 m³/h以后, 在实

验中就没有再观察到这一流型的出现。Grassi等^[14]在对油水黏度比为800:1的两相流动流型的研究中指出, 在水平管中当含油率增大到一定值后, 管道壁面上也会出现附着一层油膜的流型(oF&Do/w), 但在其它倾斜角度下(±10°和+15°)没有观察到此流型。

3.2 压降

两相流动过程产生的摩擦压降是油水两相管流研究中重点考虑的参数之一。图4给出了向上倾斜45°时管中超稠油水两相流动引起的摩擦压降的变化规律, 实验中固定水相入口流量, 通过逐渐增大入口含油率而测得两相压降。从图中可看出, 在一定的水相流量下(水相入口表观流速一定), 随着入口含油率的增加, 两相摩擦压降也逐渐增大, 当入口含油率增大到一定值后, 两相摩擦压降达到一峰值, 此后继续增大入口含油率, 两相摩擦压降的变化则出现了先快速下降再重新上升的趋势, 即随着入口含油率的增加, 摩擦压降出现了一个峰谷的演变过程。此外, 从图中不同水相入口流量下的摩擦压降曲线可知: 当水相入口流量越低时, 开始时的两相摩擦压降随着含油率增大而上升的速率越快, 且在形成峰谷之前摩擦压降的峰值也越大, 随后出现峰谷时所包含的含油率变化范围也较宽; 而随着水相入口流量的增大, 摩擦压降出现峰值和峰谷的变化趋势会越来越不显著, 当水相入口流量增大到2.5 m³/h时, 两相摩擦压降随着入口含油率的增加而呈单向递增的变化关系。通过观察实验流型发现, 在低水相入口流量下, 管内出现oF&Do/w流型时入口含油率也低, 对应的摩擦压降峰值出现的较早, 而随着水相入口流量的增加, oF&Do/w流

型就较难观察到, 在高水相入口流量时 (水相流量为 $2.5 \text{ m}^3/\text{h}$), 则无法观察到 oF&Do/w 这一流型。由此可知, 摩擦压降的变化趋势可与管内的油水两相流动流型相对应, 流型对管道中油水两相流动的摩擦压降影响较为显著。

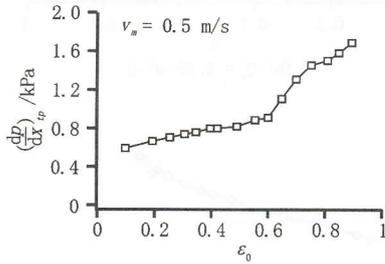


图 5 一定入口混合流速下摩擦压降随含油率的变化
Fig.5. Variation of the friction pressure-drop with the oil content at a certain mixture velocity

图 5 给出了在一定入口混合流速下, 两相摩擦压降随着入口含油率的变化关系。由图中可以看出, 当固定入口混合流速时, 随着入口含油率的增加, 倾斜管内油水两相流型从最初的油滴分散于水中流动 (Do/w 流型) 变化到水滴分散于油中流动 (Dw/o 流型), 油水两相在管内流动的摩擦压降也随着入口含油率的增加而逐渐增大。

在单相倾斜管流中, 根据动量守恒原则, 管内流体流动过程中的总压降梯度可表示为

$$\left(\frac{dp}{dz}\right) = \left(\frac{dp}{dz}\right)_g \pm \left(\frac{dp}{dz}\right)_f + \left(\frac{dp}{dz}\right)_a \quad (1)$$

式中, “±” 分别表示倾斜管中流体向上和向下流动。等式右边第三项为流体运动中加速度对压降造成的损失, 相关学者的研究指出, 在管流中, 流体加速压降值非常小, 对总压降的贡献可忽略。同时, 等式右边其它两项可表示为:

$$\left(\frac{dp}{dz}\right)_g = \rho g \sin \theta \quad (2)$$

$$\left(\frac{dp}{dz}\right)_f = \frac{2f\rho v^2}{D} \quad (3)$$

其中: f 为摩擦因子, 表示了壁面摩擦对总能量损失的重要程度, 是一个无量纲的参数。

对于油水两相在倾斜管中的流动, 常以油水混合密度和混合速度来表征流动特性, 在忽略加速压降的情况下, 管内的总压降梯度可表达为

$$\left(\frac{dp}{dz}\right)_{tp} = \rho_m g \sin \theta \pm 2f_{tp} \rho_m \frac{v_m^2}{D} \quad (4)$$

式中: ρ_m 、 v_m 和 f_{tp} 分别表示为混合密度、混合速度和两相摩擦因子。 ρ_m 和 v_m 可为:

$$\rho_m = \beta_o \rho_o + \beta_w \rho_w \quad (5)$$

$$v_m = v_{so} + v_{sw} \quad (6)$$

其中: β_o 和 β_w 分别表示入口含油率和含水率, v_{so} 和 v_{sw} 为油、水各相表观流速。

当油、水混合液有效黏度求得后, 可参考单相流动的摩擦因子计算式得到混合相的摩擦因子

$$f_{tp} = C \cdot Re_m^{-n} \quad (7)$$

式中: C 、 n 分别为摩擦因子的系数和指数, 它们的取值与流动状态有关; 当流动为湍流时, $C=0.079$, $n=0.25$; 当流动为层流时, 则 $C=16$, $n=1$ 。

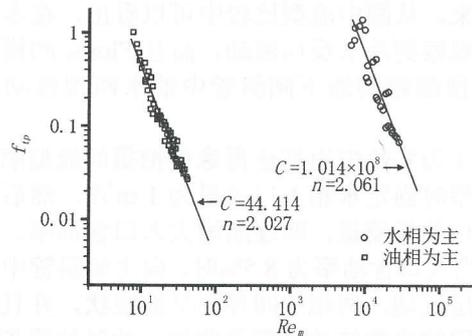


图 6 实验摩擦因子与混合雷诺数之间的关系
Fig.6. The relationship between the experimental friction factors and the mixture Reynolds number

Flores 等^[9]对油水两相在管内流动研究中指出, 计算混合雷诺数时应基于管内流动连续相的黏度, 即以水相为主或以油相为主, 而 C 和 n 值可由实验数据得到, 混合雷诺数可被定义为

$$Re_m = \frac{\rho_m D v_m}{\mu_c} \quad (8)$$

图 6 给出了实验摩擦因子与混合雷诺数之间的变化关系, 图中采用了对数坐标的表达方式。实验摩擦因子的计算可根据式 (4) 中摩擦压降反算得到。从图中的散点分布趋势可知, 当连续相 (水相或者油相) 为不同的介质时, 摩擦因子分布的区域

表 1 摩擦因子参数回归值比较
Table 1. Comparison of the friction factors

实验名称	水相				油相			
	C	n	数据点	R^2	C	n	数据点	R^2
文献[9]	6.677×10^1	0.834	26	0.573	5.710×10^1	1.066	17	0.877
文献[16]	9.078×10^7	1.822	29	0.962	4.154×10^7	1.867	20	0.923
文献[17]	1.287×10^3	1.177	29	0.884	6.642×10^3	1.579	18	0.903
文献[18]	4.483×10^3	1.401	155	0.949	2.617×10^0	0.738	41	0.379
本文	1.014×10^8	2.061	25	0.652	4.441×10^1	2.027	63	0.954

不同,但在对数坐标中均呈现出了线性分布。由此针对不同的连续相,对数据点进行了回归,当水为连续相时,由曲线回归可得 C 和 n 的值分别为 1.014×10^8 和 2.061;当油为连续相时, C 和 n 的值分别为 44.414 和 2.027。表 1 中列出了使用相关文献中的数据并应用这一方法得到的 C 和 n 的值^[9,16-18],以及数据线性拟合度 R^2 的值。从表中可以看出,Abduvayt 等^[16]的实验数据点通过曲线回归后得到的值较好,在不同的连续相介质下相关系数 R^2 分别达到了 0.962 和 0.923,而其他文献的数据回归较差。在本文的数据回归中,当油相为主时,摩擦因子与混合雷诺数间的数据回归较好, R^2 达到了 0.954,而当水相为主时, R^2 值只有 0.652,回归曲线相对较差。

4 结论

本文通过实验研究了超稠油水两相在 45° 倾斜管中的流动特征,给出了两相流动的流型图和压降曲线,通过分析实验中所测得的数据得出以下主要结论:

(1) 超稠油水两相在倾斜管中的流动流型与低黏度比的油水两相流型具有一定的差异。实验中观察到,在低入口水相流量下,当入口含油率增大到一定值后,管道内壁面上层附着了一层油膜且管道内部呈现油水相互掺混流动的流型,这一流型在低黏度比的油水两相流动中从未观察到,而且当入口水相流量增加到一定值后,在本实验管道中也未能观察到这一流型。由于 Flores 流型预测模型是基于低黏度比下油水两相在 45° 倾斜管中的流动,因此该模型不能准确预测高黏度比油水两相流动流型。

(2) 在低入口水相流量下,随着入口含油率的增加,油水两相压降随之逐渐增大,当压降值到达一峰值后逐渐降低到峰谷,而后又重新增大,随着入口水相流量的增大,压降处于峰谷的入口含油率

范围却逐渐缩小,直至消失。对两相摩擦因子的研究发现,可根据管道内油水两相流动的流型确定混合液的连续相,进而可得到摩擦因子的计算表达式,这有利于对两相摩擦压降进行有效的预测。

参 考 文 献:

- [1] 许晶禹. 气体/非牛顿幂律流体两相倾斜管流研究[D]. 中国科学院研究生院博士论文,北京,2007.
XU Jing-yu. Studies on co-current gas/non-newtonian power-law fluid flows in inclined pipes[D]. Ph. D., Thesis, Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 2007.
- [2] XIA Guo-dong, CHAI Lei. Influence of surfactant on two-phase flow regime and pressure drop in upward inclined pipes[J]. Journal of Hydrodynamics, 2012, 24(1): 39-49.
- [3] MUKHERJEE H K, BRILL J P, BEGGS H D. Experimental study of oil-water flow in inclined pipes[J]. Transactions of the ASME, 1981, 103(1): 56-66.
- [4] VIGNEAUX P, CHENOIS P, HULIN J P. Liquid-liquid flows in an inclined pipe[J]. AIChE Journal, 1988, 34(5): 781-789.
- [5] ZAVAREH F, HILL A D, PODIO A L. Flow regimes in vertical and inclined oil/water flow in pipes[C]. SPE 18215, Presented at the 63rd Annual Technical Conference and Exhibition, Houston, USA, 1988, 2-5.
- [6] TABELING P, POULIQUEN O, THERON B, et al. Oil-water flows in deviated pipes: experimental study and modelling[C]. In Proceedings of the 5th International Conference on Multiphase Flow Production, Cannes, France, 1991, 294-306.
- [7] DING Z X, ULAH K, HUANG Y. A comparison of predictive oil/water holdup models for production log interpretation in vertical and deviated wellbores[C]. In

- Proceedings SPWLA 35th Annual Logging Symposium, Tulsa, USA, 1994, 1-12.
- [8] KURBAN A P A. Stratified liquid-liquid flow[D]. Ph. D. Thesis, Imperial College, London, UK, 1997.
- [9] FLORES J G. Oil-water flow in vertical and deviated wells[D]. Ph.D. Thesis, The University of Tulsa, Tulsa, USA, 1997.
- [10] HASAN A R, KABIR C S. A simplified model for oil/water flow in vertical and deviated wellbores[C]. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, New Orleans, USA, 1998.
- [11] 汪志明, 肖京男, 魏建光, 等. 水平井筒油水变质量分散流动压降研究[J]. 水动力学研究与进展, A辑, 2011, 26(3): 284-288.
- WANG Zhi-ming, XIAO Jing-nan, WEI Jian-guang, et al. Study on pressure drop of oil-water vary mass dispersed flow in horizontal wellbore[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2011, 26(3): 284-288.
- [12] 孙焕强, 吴应湘, 张军, 等. 管道旋流中油芯的形成条件与形态研究[J]. 水动力学研究与进展, A辑, 2012, 27(2): 168-173.
- SUN Huan-qiang, WU Ying-xiang, ZHANG Jun, et al. Formation conditions and pattern of oil-core in oil-water swirling pipe flow[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2012, 27(2): 168-173.
- [13] LUM J Y L, LOVICK J, ANGELI P. Low inclination oil-water flows[J]. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 2004, 82(2): 303-315.
- [14] GRASSI B, STRAZZA D, POESIO P. Experimental validation of theoretical models in two-phase high-viscosity ratio liquid-liquid flows in horizontal and slightly inclined pipes[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2008, 34(10): 950-965.
- [15] ZONG Y B, JIN N D, WANG Z Y, et al. Nonlinear dynamic analysis of large diameter inclined oil-water two phase flow pattern[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2010, 36(3): 166-183.
- [16] ABDUVAYT P, MANABE R, WATANABE T, et al. Analysis of oil/water flow tests in horizontal, hilly terrain, and vertical pipes[J]. SPE Production and Operations, 2006, 21(1): 123-133.
- [17] JANA A K, GHOSHAL P, DAS G, et al. An analysis of pressure drop and holdup for liquid-liquid upflow through vertical pipes[J]. Chemical Engineering and Technology, 2007, 30(7): 920-925.
- [18] 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): 930-93