

倾斜管路中超稠油水两相流动研究

刘海飞¹, 朱平辉², 许晶禹^{1*}

(1* 中国科学院力学研究所, 北京, 100190, E-mail: xujingyu@imech.ac.cn)

2 解放军后勤学院后方专业勤务系油料教研室, 北京, 100858)

摘要: 通过实验研究了超稠油 (20°C 下, 密度 860kg/m³, 黏度 1680mPa·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 50mm 的透明有机玻璃管组成, 向上倾斜管段长为 4.5m。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粘度比下的流型具有一定的差异, 特别地, 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, 两相压降出现了峰谷的变化关系。

关键词: 油水两相流动; 倾斜管; 超稠油; 流型; 压降

1 引言

对于研究两相或多相介质在管道中流动的特性, 人们通常集中于研究相对简单的水平流动和垂直流动两种典型情况, 而对于倾斜管道中两相或多相流动研究开展的较少。然而, 在生产实际中, 特别是在石油工业, 倾斜管道显得越来越突出和重要。这主要表现在油气集输方面, 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]。此外, 根据我国油田所生产的原油特性, 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, 并能指导实际工程应用, 已成为我国石油工业中多相流动研究领域的重要内容和迫切需要解决的问题。

通过对国内外学者开展的倾斜管中油水两相流动研究工作的回顾可知^[2-15], 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]报道了较高黏度比下 (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。他们在研究中发现, 高黏度比油水两相流动更容易形成水相在外围而油相在中间的环状流, 并且在一定条件下水平管道中观察到了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; 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。从上述的文献总结中可知，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尚缺乏足够的实验数据和理论分析。因此，本研究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为倾斜管道实验系统流程图。实验中，用于储存油相和水相的罐体体积均为 1m^3 ，混合分离罐由两个 1m^3 罐体连接组成。整个流程主管路系统由内径为50mm的圆管组成，上升和下降两组管路分别长为4.5m，跨度0.75m，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 $0\sim 45^\circ$ 之间调整，在本实验中选定了管道倾角为 45° 。油、水两相分别由各自的供应系统（油泵和水泵）供应，经过流量计后通过T型三通混合进入实验管路，最终流到混合分离罐进行分离后再循环使用。

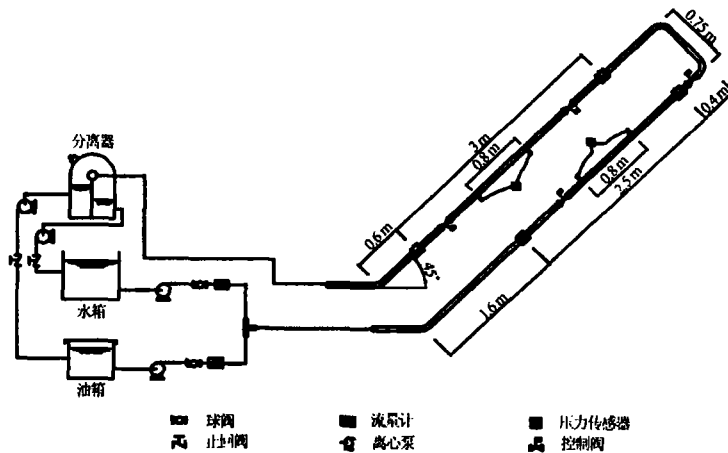


图1 倾斜管流程示意图

管中的流量参数通过流量计测量得到，压力信号采用霍尼韦尔压力传感器测量后，再经放大器放大并送至DAQP-12H数据采集系统进行数据采集，采样频率为500Hz。压力数据处理采用了时间平均法，即对每个测量点进行20s内的时间平均。流型识别采用高速摄像机记录每个工况下的流动状态，慢镜头回放观察流型。为了保证实验数据的可靠性，在每组工况下都让系统运行一段时间以确保流动相对稳定，再进行相应的数据采集。

实验介质温度控制在 $19\sim 21^\circ\text{C}$ 。实验液相介质分别为自来水和白油。 20°C 下水相的物性参数为：密度 998kg/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 下的物性参数为：密度 860kg/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，记录不同流型下油、水两相的表现流速并对

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：0~0.5m/s，油相：0~1m/s。实验中针对不同的油、水流量比下，共完成了 89 组数据采集工作。

3 结果分析与讨论

3.1 油水两相流型

目前，对于倾斜管中两相流型图的研究主要集中于低黏度比下的油水两相流动，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，流动过程中油相偏于聚集在管道上方，黏附在管壁上，并且当油相含率达到一定值后，倾斜管内壁面出现了一层油膜，附着在管道壁面上，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，中间为水包油（oF&Do/w, oil film at the wall and dispersion of oil in water）；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 模型不能准确预测高黏度比下倾斜管中油水两相流动的流型。

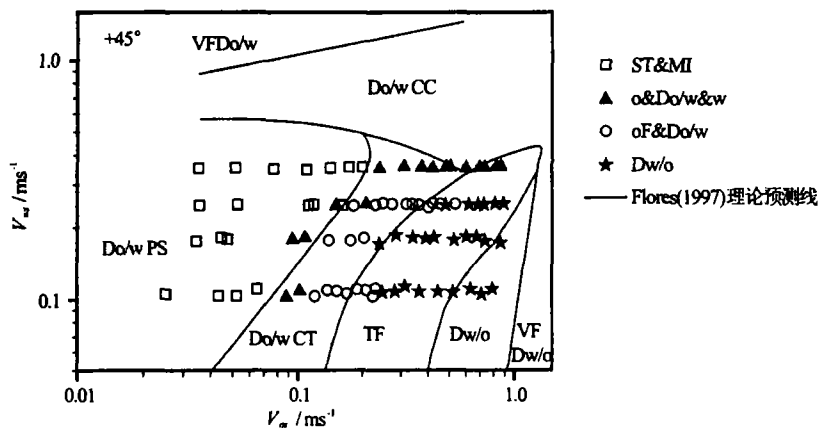


图2 倾斜管内超稠油水两相流型图

图 3 所示为实验中用快速摄像机拍摄的典型流型照片。观察流型时固定水相入口流量为 1m³/h，然后逐渐增大入口油相流量，即逐渐增大入口含油率。实验中观察到，当入口含油率较低时，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，如图 3(a)所示；继续增大入口含油率，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,此时流型为 $o\&D_o/w\&w$; 当入口含油率增大到 45.0% 时, 向上倾斜管中出现了管道壁上附着一层油膜, 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, 流型为 $oF\&D_o/w$, 如图 3(b)所示; 此后, 由于管壁油膜的存在较难分辨管道内部的水油流动流型, 而在入口含油率提高到一定值后, 在管道壁上可观察到水珠, 即管道壁面的纯油膜被破坏, 认为此时的流型为油包水流型, 即 D_w/o 。实验中发现, $oF\&D_o/w$ 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 $2.5\text{m}^3/\text{h}$ 以后, 在本实验中没有观察到这一流型的出现。Grassi 等^[14]对油水黏度比为 800:1 的两相流动流型研究中指出, 在水平管中当含油率增大的一定值后, 管道壁上也会出现附着一层油膜的流型 ($oF\&D_o/w$), 但在其他倾斜角度下 ($\pm 10^\circ$ 和 $+15^\circ$) 没有观察到此流型。

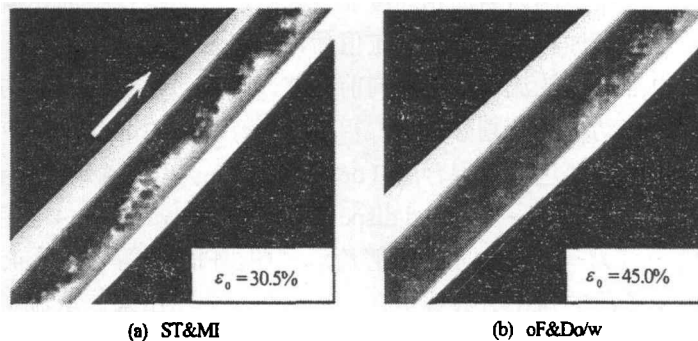


图 3 +45° 倾斜管内油水两相流型照片 (水相入口流量 $Q_w=1\text{m}^3/\text{h}$)

3.2 两相压降

两相流动过程产生的摩擦压降是在油水两相管流研究中重点研究的参数之一。图 4 给出了向上倾斜 45° 下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, 两相摩擦压降逐渐增大, 当入口含油率增大到一定值后, 两相摩擦压降处于一峰值, 此后继续增大入口含油率, 两相摩擦压降的变化出现了先快速下降再重新上升的趋势, 即摩擦压降存在一峰谷。从不同水相入口流量下的摩擦压降曲线图中可知, 当水相入口流量越低时, 一开始两相摩擦压降随着含油率增大而上升的速率越快, 且在到达峰谷之前摩擦压降的峰值越大, 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越来越不显著, 当水相入口流量增大到 $2.5\text{m}^3/\text{h}$ 时, 两相摩擦压降随着入口含油率的增加而呈单调递增的变化关系。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。通过观察实验流型发现, 在低水相入口流量下, 管内出现 $oF\&D_o/w$ 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, $oF\&D_o/w$ 流型较难观察到, 或者当高水相入口流量时 (在本实验中, 水相流量为 $2.5\text{m}^3/\text{h}$), 无法观察到 $oF\&D_o/w$ 这一流型。由此可知, 流型对管道中油水两相流动的摩擦压降影响较为显著。

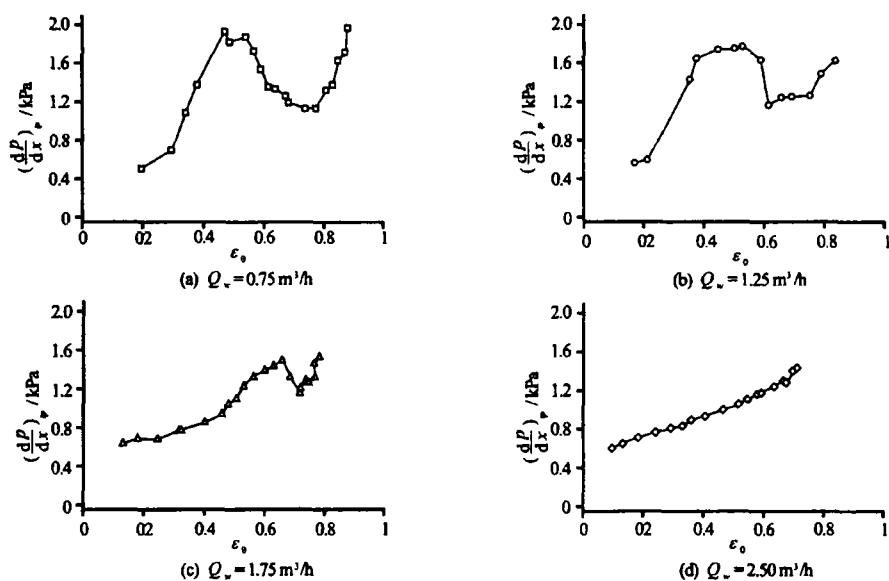


图 4 不同水相流量下上升管摩擦压降随含油率的变化关系 (+45°)

4 结论

本研究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, 通过分析实验中测到的数据得到以下主要结论:

(1) 对于超稠油水两相在倾斜管中的流动流型, 与低黏度比下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, 管道内出现壁面上附着一层油膜而管内部为油水相互掺混流动, 这一流型在低黏度比下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, 在管道中也未能观察这一流型。

(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; 且压降处于峰谷的入口含油率范围随着入口水相流量的增大而缩小直至消失。

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. 北京: 中国科学院研究生院博士论文, 2007.
- 2 Mukhopadhyay H. An experimental study of two-Phase oil-water flow in inclined pipes. M.S. Thesis, The University of Tulsa, 1977.
- 3 Mukherjee H K, Brill J P, Beggs H D. Experimental study of oil-water flow in inclined pipes. Transactions of the ASME, 1981, 103: 56-66.
- 4 Vigneaux P, Chenois P, Hulin J P. Liquid-liquid flows in an inclined pipe. AIChE Journal, 1988, 34: 781-789.

- 5 Zavareh F, Hill A D, Podio A L. Flow regimes in vertical and inclined oil/water flow in pipes. SPE 18215. Presented at the 63rd Annual Technical Conference and Exhibition, Houston, Texas, 1988, 2-5.
- 6 Tabeling P, Pouliquen O, Theron B, et al. Oil-water flows in deviated pipes: experimental study and modelling. In Proceedings of the 5th International Conference on Multiphase Flow Production, Cannes, France, 1991, 294-306.
- 7 Ding Z X, Ullah K, Huang Y. A comparison of predictive oil/water holdup models for production log interpretation in vertical and deviated wellbores. In Proceedings SPWLA 35th Annual Logging Symposium, Tulsa, OK, USA, 1994, 1-12.
- 8 Kurban A P A. Stratified liquid-liquid flow. Ph.D. Dissertation, Imperial College, London, U.K., 1997.
- 9 Flores J G. Oil-water flow in vertical and deviated wells. Ph.D. Dissertation, The University of Tulsa, 1997.
- 10 Hasan A R, Kabir C S. A simplified model for oil/water flow in vertical and deviated wellbores. SPE, In Proceedings and Facilities, 1999, 141:56-62.
- 11 Angeli P, Lovick S, Lum Y L. Investigations on the three-layer pattern during L-L flows. 40th European Two-Phase Flow Group Meeting, Stockholm, 2002, 10-13.
- 12 Ullman A, Zamir M, Ludmer Z, et al. Stratified laminar counter-current flow of two liquid phases in an inclined tubes. Int. Journal of Multiphase Flow, 2003, 29:1583-1604.
- 13 Lum J Y L, Lovick J, Angeli P. Low inclination oil-water flows. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 2004, 82: 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. International Journal of Multiphase Flow, 2008, 34: 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. International Journal of Multiphase Flow, 2010, 36: 166-183.

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

LIU Hai-fei¹, ZHU Ping-hui², XU Jing-yu^{1*}

(1* Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100190, Email: xujingyu@imech.ac.cn)

2 Research Room of Oil, Department of Rear Professional Service, Logistics College of the CPLA, Beijing, 100858)

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 50mm, are made of transparent Perspex pipes to enable the visual observation of the oil-water flow pattern and the length of inclined pipes is 4.5m. The oil-water two-phase flow pattern and pressure drop graphs are 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 is 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