

油水两相流粘度变化对涡轮流量计测量影响的实验研究

李东晖, 丰飞飞, 许晶禹, 吴应湘
(中国科学院力学研究所, 北京 100190)

摘要

利用涡轮流量计测量了油水两相流动时的混合速度, 重点研究了油相粘度变化和流量计入口油水相含率变化对测量精度的影响。实验采用了七种不同的油相粘度(50, 160, 225, 400, 700, 1100, 1450mPa·s), 并在含油率0-100%范围内记录了292组不同油水混合流量下的测量值。研究结果表明, 当油相粘度为低粘度50和160mPa·s时, 涡轮流量计的测量误差较小, 且不受入口油相含率的影响, 绝对误差均在±5%以内。当油相粘度大于225mPa·s时, 随着入口油相含率的增加, 误差逐渐增大。当油相粘度进一步提高到1100mPa·s以上时, 涡轮流量计在较低的入口油相含率下进入非线性失效区。此外, 实验数据还显示, 用涡轮流量计测量油水混合流速时, 测量结果对油水两相流流型不敏感。

关键词: 油水两相流; 涡轮流量计; 粘度; 相含率; 流型

1 引言

随着工业的快速发展, 能源的需求量日益增加, 陆上油气资源日渐枯竭, 促使各国转向海洋石油的开发。陆上油田输油管路采用的传统的计量技术并不完全适合在海洋平台使用, 因此促使工业界和学术界联合开发新型的结构紧凑的多相流量计。从上个世纪80年代以来, 石油工业界开始关注油气水混合物的计量, 并投入了可观的人力和物力来开发适用于石油工业的多相流量计。多相计量研究的困难来源于多相流动过程本身的复杂性, 相对于单相流可以直接地计算流速等参数, 多相流模型的建立需要考虑的参数要复杂得多。一般来说, 理想的油气水三相流量计应该具有各相5%的计量精度, 并要求非侵入性, 高可靠性, 与流型无关性以及对于整个相含率范围的适用性。虽然近年来提出了非常多的方案, 但到目前为止还没有一种商业化的流量计能完全达到这些标准^[1]。

涡轮流量计是被工业界普遍采用的用于测量单相流动的速度式流量仪表。它以动量守恒为基础, 流体冲击涡轮叶片, 使涡轮旋转。涡轮的旋转速度随流量的变化而变化, 最后从涡轮的转速求出流量值。典型的液体涡轮流量计的特性曲线(如图1所示)可以分成两个主要的区域, 即线性区和非线性区。涡轮流量计的有效工作区间主要包括其线性工作区间以及部分非线性区间。由于涡轮流量计在高温、高压等比较严酷的环境下, 仍然具有较高精度以及稳定性, 同时, 相对于其他流量计来说, 涡轮流量计有着较大的量程范围, 并具有对流动瞬态变化后的快速反应的特点^[2], 因此, 一些研究者尝试应用涡轮流量计来进行两相流量的测量研究。例如, Johnson 和 Farroll 在1995年应用涡轮流量计测量了水气两相流的混合流量, 给出了不同气相含率条件下误差随流量变化的关系曲线^[3]。结果发现, 随着气相含率的增加涡轮流量计的误差逐渐增大, 在气相含率低于25%时, 误差可控制在12.5%以内。对于油水流动, Skea 和 Hall(1999)应用涡轮流量计对低粘度油和水两相流的混合测量进行了测量^[4]。试验中, 油相含率的范围为3%~15%和85%~97%, 实验结果说明对于油相粘度(10mPa·s)较低的油水两相流动, 涡轮流量计的误差可以控制在1%以内。由于测量主要针对低黏度的油水两相流, 并且

基金项目: 中国科学院知识创新工程方向性基金资助项目(KJ CX2-YW-L02); 国家自然科学基金面上项目(10572143)

油相含率限定在一个非常有限的范围内,因此,对于全油相含率范围内的变化及高粘油相对于涡轮流量计测量造成的影响等,还有待进一步的研究。

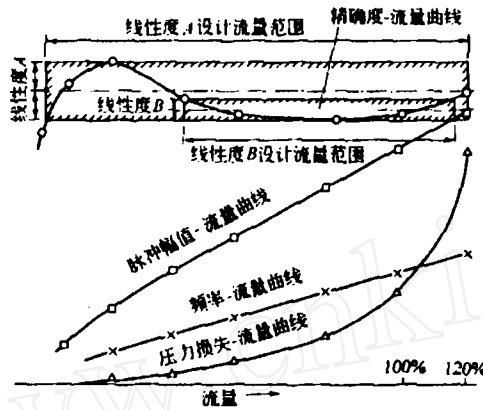


图1 涡轮流量计特性曲线

本文研究的目的在于油水两相流的流量计研究,设想采用 Gammar 射线获得相含率,用涡轮流量计来获得混合流速,结合二者结果得到各相流量。由于原油粘度分布变化很大,为了达到这个目的,就要获知油相粘度变化对于涡轮流量计测量精度的影响,从而确定涡轮流量计的工作条件和工作范围。同时,本实验还在低粘度条件下研究了流型对于涡轮流量计的工作性能的影响。

2 实验系统

2.1 实验装置

本实验是在中国科学院力学研究所的多相流实验平台上完成的。图 2 为实验装置示意图。油水分别由油箱和水箱供应,经过各自的流量计后,进入实验管线,混合液流经实验段后被分离再循环使用。实验管线采用内径 50mm 的透明有机玻璃管,易于观察油水两相的流动状态,管线从入口到分离器总长约 35m。

实验管线入口流量计量,水相采用电磁流量计,油相采用腰轮流量计,油相和水相经过试验管线后,用 LWGY 型涡轮流量计对其进行混合流速的测量。LWGY 型涡轮流量计公称通径为 50mm,其测量流量范围在 4 m³/h ~40m³/h,在测量单相流体时,其精度可达 0.25%。流型识别采用摄像机记录每次实验条件下的流动状态,慢镜头回放观察流型。为保证实验数据的可靠性,对每个测量点,都在流量调整后的 5min~8min 分钟流动相对稳定后再采集数据和观测流型。

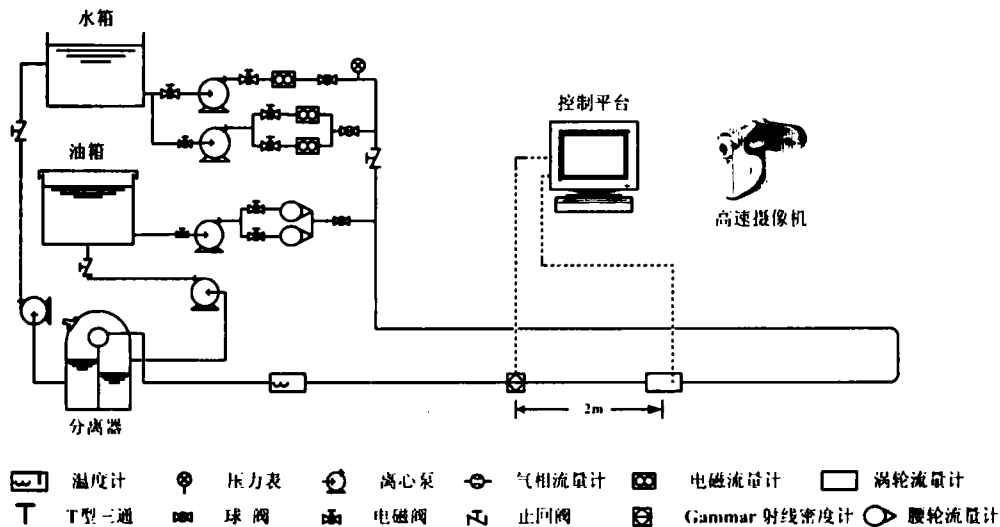


图2 油水两相流动流程示意图

2.2 实验工质及实验过程

实验水相为普通自来水, 20 °C 时的粘度为 1.005 mPa·s, 油相采用无色、透明的矿物油, 俗称白油, 在常温常压(20 °C, 0.101 mPa)下, 我们分别选用其粘度为 50、160、225、400、700、1100 和 1450 mPa·s, 共七种样品。同时, 为便于实验时的流型观察, 在水中加入了高锰酸钾(颜色剂) 以便于识别。实验工质温度控制在 19 °C~21 °C, 在特定的粘度下, 给定油相流量后, 调整水相流量, 观察实验段的油水两相流型, 记录入口处不同流型的油相和水相表观流速和实验段的混合流速。表 1 给出了不同粘度下的实验数组。

表 1 实验方案设计

粘度 (mPa·s)	50	160	225	400	700	1100	1450
水的流量 $Q_{w_w}(\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1})$	0~15	0~15	0~15	0~15	0~15	0~15	0~15
油的流量 $Q_o(\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1})$	1.7~13.1	2.5~12.1	2.9~12.1	0.8~9.9	0.7~5.7	0.7~1.4	1.4~2.8
数据点数 m	52	41	43	54	40	31	31

3 结果与讨论

3.1 油相粘度和入口含率的影响

首先固定油相粘度, 用电磁流量计测量入口处水相流量 Q_w , 用腰轮流量计测量入口处油相流量 Q_o , 分别得到入口处油相、水相的体积相含率 β_o 和 β_w 。即:

$$\beta_o = Q_o / (Q_o + Q_w) = Q_o / Q_{M1} \quad (1)$$

$$\beta_w = Q_w / (Q_o + Q_w) = Q_w / Q_{M1} = 1 - \beta_o \quad (2)$$

式中 Q_{M1} 为管道入口处的混合流量。

同时, 在实验管段用涡轮流量计测量两相混合流量(如图 2 所示), Q_{M2} , 对比 Q_{M1} 和 Q_{M2} , 可以得到涡轮流量计的测量误差(相对误差):

$$Er = (Q_{M2} - Q_{M1}) / Q_{M1} \quad (3)$$

图 3 至图 9 给出了在七种不同粘度下, 涡轮流量计的测量误差随入口处油相含率的变化关系图。以实际应用中可以接受的误差 $\pm 5\%$ 作为其有效工作区间的判断标准(在图中, $\pm 5\%$ 的区间用虚线标出), 并且在每个图标上, 用一条竖直的虚线, 作为有效工作区域的分界线。图 3 给出了油相粘度为 50 mPa·s 时相对误差随入口处油相含率变化关系图。可以看出, 在整个油相含率的变化范围内, 误差可以控制在 $\pm 5\%$ 以内, 只有个别的点超过了 5% 的范围, 因此可以认为在油相粘度为 50 mPa·s 时, 涡轮流量计在任何油相含率下均处于有效工作区间。对于油相粘度为 160 mPa·s 的实验研究结果显示(如图 4 所示), 随着油相含率 β_o 的增加, 相对误差有逐渐增大的趋势, 同时, 绝对误差值也由 β_o 较小时的正值, 变为 β_o 较大时的负值。但是大部分的入口油相含率 β_o 的变化范围内, 相对误差在 $\pm 5\%$ 以内, 这与黏度为 50 mPa·s 时的情况大体一致。

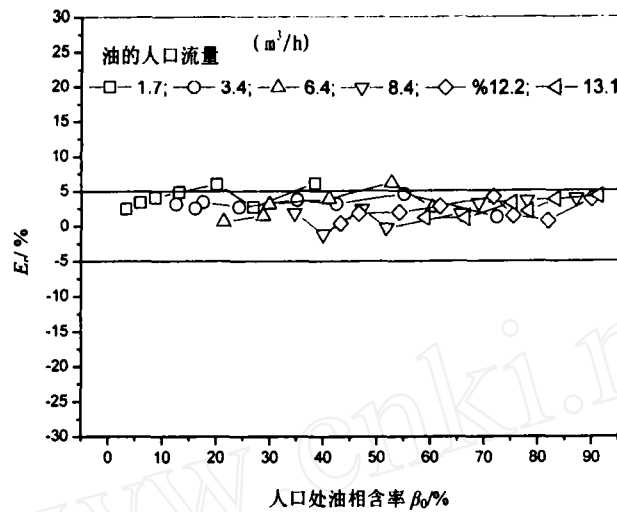


图3 油相粘度为 50mPa·s 时相对误差 E_r 随入口处油相含率 β_0 变化关系图

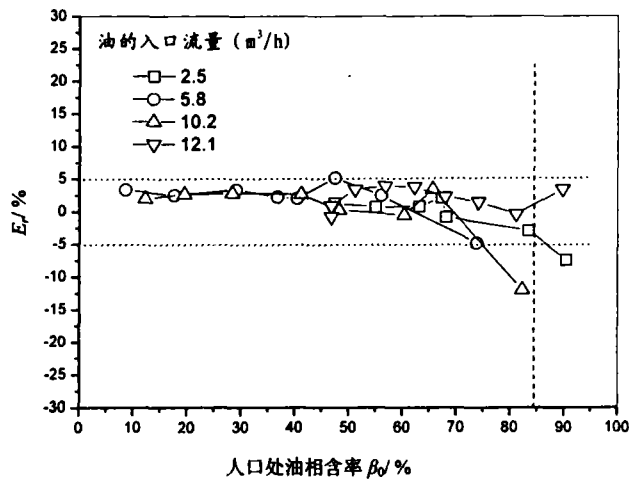


图4 油相粘度为 160mPa·s 时相对误差 E_r 随入口处油相含率 β_0 变化关系图

当油相粘度提高至 225 mPa·s 时 (图 5 所示), 观察到了与图 4 相似的曲线变化趋势, 不同的是: 当 β_0 的小于 70% 时, 相对误差在 5% 以内, 涡轮流量计处于有效工作区间。然而, 随着 β_0 的增加, 误差曲线下降的幅度增大, 当 β_0 达到 70% 时, 整体误差超过了 5% 的界线, 达到 10% 以上, 此时, 涡轮流量计超出了其有效工作区间, 失效区开始出现。

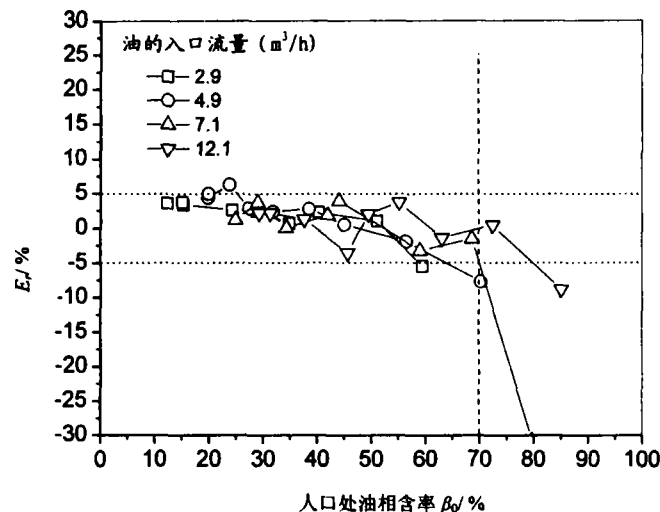


图5 油相粘度为 225mPa·s 时相对误差 E_r 随入口处油相含率 β_0 变化关系图

图 6 和图 7 分别给出了油相粘度为 400 mPa·s 和 700 mPa·s 时相对误差随入口处油相含率的变化关系图。可以看出, 当 β_0 达到 50%~60% 时, 误差出现比较陡峭的下降, 其整体误差超过 5% 的界线, 涡轮流量计超出了有效工作区, 而且, 随着 β_0 的增加, 绝对误差也由正值变成负值。

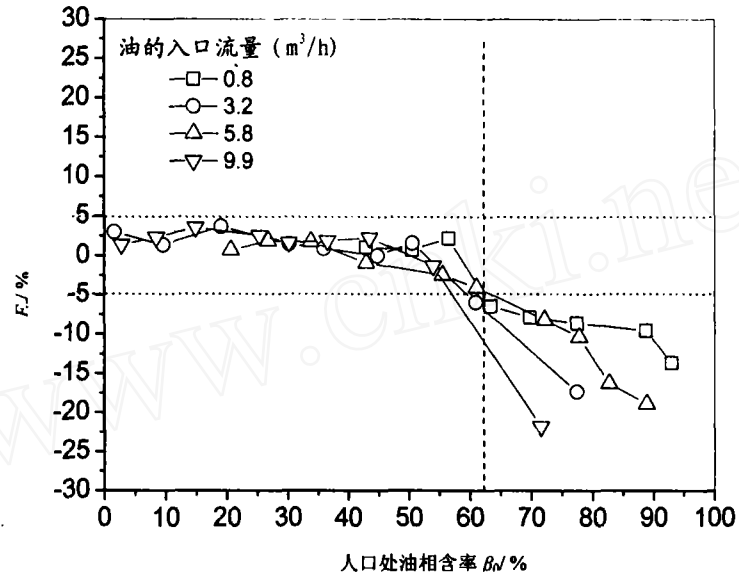


图 6 油相粘度为 400mPa·s 时相对误差 E_r 随入口处油相含率 β_0 变化关系图

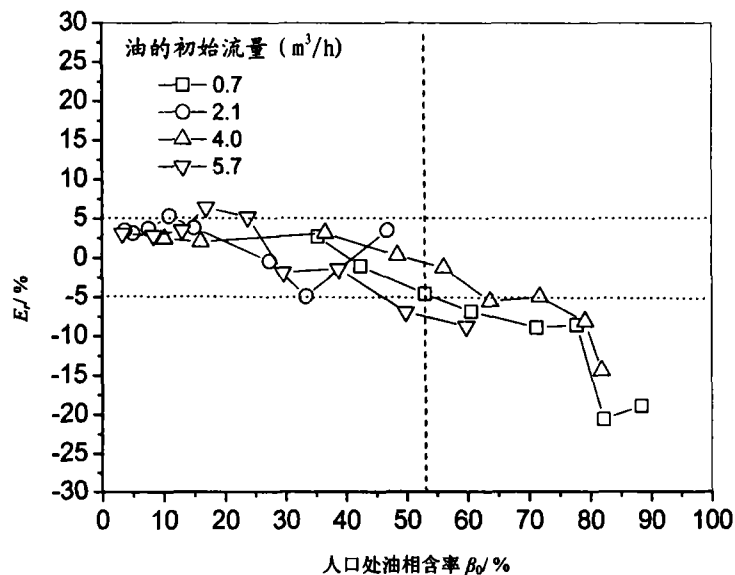


图 7 油相粘度为 700mPa·s 时相对误差 E_r 随入口处油相含率 β_0 变化关系图

为了进一步研究超粘油对于涡轮流量计测量精度的影响, 我们分别测量了油相粘度为 1100 和 1450 mPa·s 时涡轮流量计测量油水两相流量时的工作特性。图 8 和图 9 给出了实验结果, 可以看出, 当 β_0 仅为 30%~40% 左右时, 误差便开始急剧下降。因此, 对于超粘油来说, 涡轮流量计的仅能在低含油率的情况下工作, 有效工作区的范围非常狭窄。

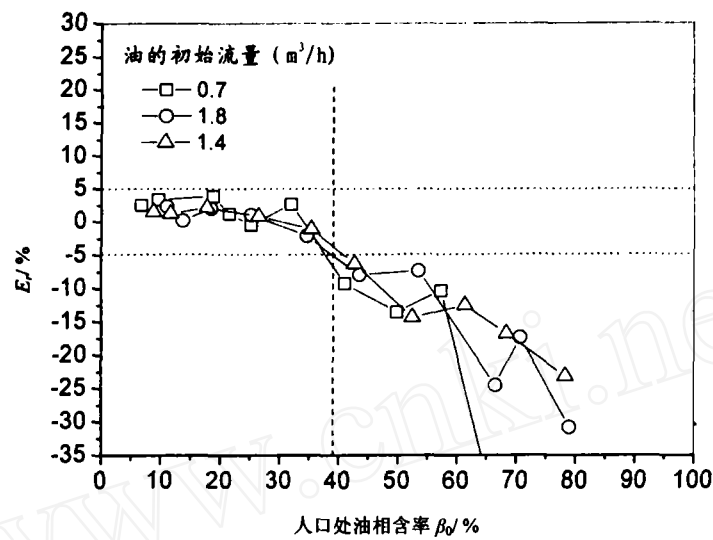


图8 油相粘度为 1100mPa·s 时相对误差 E_r 随入口处油相含率 β_0 变化关系图

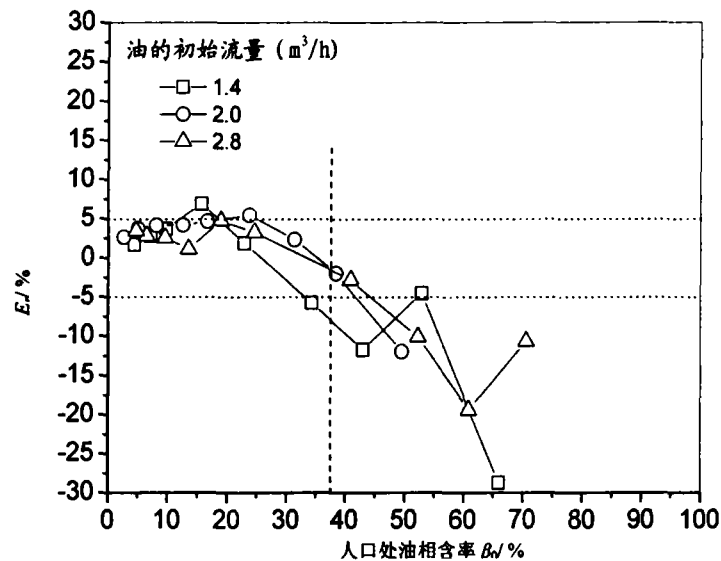


图9 油相粘度为 1450mPa·s 时相对误差 E_r 随入口处油相含率 β_0 变化关系图

从上述实验结果可以看出, 涡轮流量计的相对误差随着入口处油相含率 β_0 的增加有逐渐增大的趋势, 并且涡轮流量计的有效工作区间也在逐渐的减少。对于油相粘度较大时的油水流动来说, 测量误差之所以随着入口处油相含率的增加逐渐增大的原因是随着入口处油相含率的增加, 导致油水两相流的实际黏度在逐渐的增大, 进而导致了涡轮流量计的有效工作区逐渐变窄。同时我们还可以看出, 在其有效工作区域, 在粘度较低时, 其绝对误差大都为正值, 即测量值比真实值要大, 而在黏度较大时, 其绝对误差大都为负值, 即测量值要比真实值小。

3.2 流型的影响

为了考察涡轮流量计计量精度与流型之间的关系, 绘制了粘度为 50mPa·s 时的流型图, 并且与以前的学者得到的流型图进行了比较。实验中流型是观察实验管段得到的, 同时采用 Laflin 和 Oglesby 提出的方法来定义流型^[5]。在一定的混合流速和输入油相含率下, 在水平实验管段观察到了四种流型, 即: 分层流 (SW), 双连续流 (DC), 油含水 (W/O) 以及水含油 (O/W)。图 10 给出了实验中得到的流型图, 其中固定线为 Lovick 和 Angeli 在 2001 年得到的流型图^[6]。

对于两个流型转化边界可以看出, 本实验中得到的流型图和 Lovick 和 Angeli 得到的流型图具有很大的 consistency。同时, 结合粘度为 50mPa·s 时绝对误差随入口处油相含率变化关系图 (如图 3 所示),

可以看出, 每种流型下的误差之间并没有明显的区别, 因此可以认为, 涡轮流量计的工作性能对流型并不是很敏感。

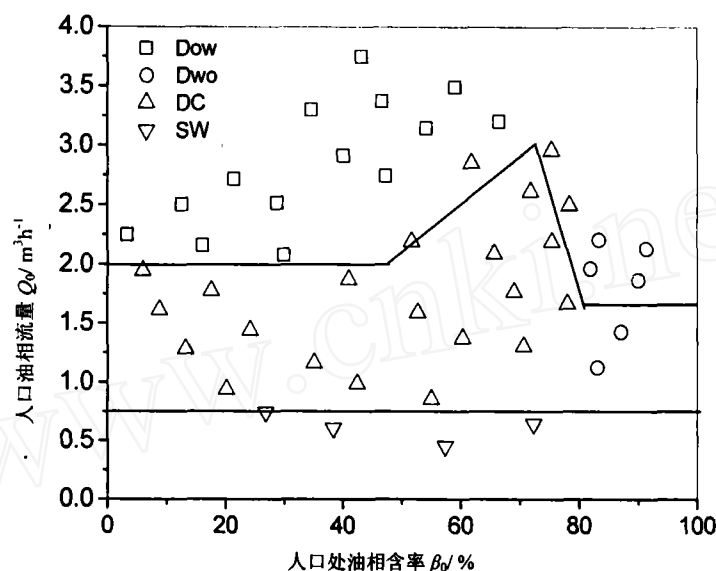


图 10 油水两相水平流动时的流型图

4 结论

本文应用涡轮流量计测量了不同油相粘度下的油水两相混合流量, 研究了油相粘度和入口相含率对其工作性能的影响, 得到了粘度为 50, 160, 225, 400, 700, 1100 和 1450 mPa·s 等七种不同粘度下, 测量误差随入口处油相含率的变化曲线图。通过实验发现, 黏度为 50 mPa·s 和 160 mPa·s 时, 在 0~100% 的入口油相含率变化范围内, 相对误差大都在 $\pm 5\%$ 以内, 可认为涡轮流量计工作在有效工作区。但当粘度大于 225 mPa·s, 随着油相相含率的增加, 误差有逐渐增大的趋势, 涡轮流量计的线性工作区间缩窄, 并随着油相粘度的进一步增加, 达到 1100 mPa·s 时, 涡轮流量计在很低的油相含率下即进入失效区, 这表明油水的混合粘度是影响涡轮流量计线性工作区间的主要因素。

本文还研究了低粘度下不同流型时涡轮流量计的工作性能, 通过实验发现, 不同流型下其误差之间并没有明显的变化, 因此, 可以认为其工作性能对流型不敏感。

涡轮流量计可以在低混合粘度下用于油水两相流的流速测量, 高混合粘度下涡轮流量计的线性工作区间缩窄, 限制了其测速范围, 在实际应用时应加以注意。

参考文献:

- [1] FALCONE G, HEWITT G F, ALIMONTIC and HARRISON B. Multiphase flow metering: Current trends and future developments [J]. Journal of Petroleum Technology, 2002, 54 (4): 77-84.
- [2] LUXHUI J T. An artificial neural network for nonlinear estimation of the turbine flow-meter coefficient [J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 1998, 11: 723-734.
- [3] JOHNSON M W and FARROLL S. Development of a turbine meter for two-phase flow measurement in vertical pipes [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 1995, 4(6):279-282.
- [4] SKEA A F and HALL A W R. Effects of water in oil and oil in water on single-phase flow meters [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 1999, 10: 151-157
- [5] LAFLIN G C and OGLESBY K D. An Experimental Study on the Effects of Flow-Rate, Water Fraction and Gas-Liquid

Ratio on Air-Oil-Water Flow in Horizontal Pipes [D]. The University of Tulsa, 1976.

- [6] LOVICK J and ANGELI P. Experimental studies on the dual continuous flow pattern in oil-water flows [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2004, 30:139-157.

Experimental Investigation of the Influences of Viscosity Variations of Oil-Water Two Phase Flow on Turbine Flow-Meter

LI Dong-hui, FENG Fei-fei, XU Jing-yu, WU Ying-xiang
(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract

The mixture velocity measurement of oil-water two phase flow is carried out by a turbine flow-meter in this paper. The research target is the influences of viscosity variations and oil fraction of oil-water two phase flow on Turbine Flow-Meter. The experiment is finished in seven different oil viscosities and 292 measured values are recorded under the oil fraction from 0 to 100%. The results show that, when oil viscosity is 50 mPa·s and 160mPa·s, measured errors are not affected by input oil fraction and relative error is within $\pm 5\%$; but when oil viscosity reaches to 225mPa·s, absolute errors turn into negative values from positive values and take on rapidly decreasing trend along with the increases of oil input fraction; when oil viscosity further increases to 1100mPa·s, the turbine flow-meter turns into nonlinear work area. In addition, when the mixture velocity is measured by turbine flow-meter, the results are not sensitive to the flow-pattern according to the experimental data.

Key words: oil-water two-phase flow; turbine flow-meter; viscosity; phase fraction; flow-pattern