

采用电阻层析成像技术的油水两相流流型特征研究

黄玉彤, 李华*, 马乃庆, 王淑京, 吴应湘

(中国科学院力学研究所, 北京 100190, E-mail:huangyt91@outlook.com)

*通讯作者, Tel.: +86 18610891288, E-mail: lihua@imech.ac.cn

摘要: 流型问题在多相流研究中占有重要地位, 对于流型转换点的研究具有很高的学术价值, 但是其研究比较困难, 对其影响因素的研究有待完善, 测量手段也有待改进。本研究采用电阻层析成像技术和压力传感器等对油水两相流流型特征进行了实验研究, 分析数据重建图像并绘制了流型图。实验使用白油和水作为介质, 在管道内径 50mm, 总长约 20m 的有机玻璃循环管路中进行。电阻层析成像 (Electrical Resistance Tomography, ERT) 系统采用单截面 16 电极, 并在管道上加装压力传感器, 通过改变管道入口处水相和油相的表观速度来产生不同流型。实验中采集了不同电极对上的电压变化, 其后运用反投影算法重建管道截面内电导率分布, 进而判断其中各相相分布, 实现可视化测量, 最后基于流型特征根据实验结果做出对不同流况的流型预判, 绘制流型图, 并绘制各流型之间的转换边界曲线, 和已有流型图进行对比, 为流型识别的深入研究提供支持。

关键词: 油水两相流; 水平; ERT; 流型图

1 引言

为应对日益严峻的能源问题, 如今的石油开采越发向深海、沙漠等恶劣的环境扩展。而在石油开采和运输的过程中, 油水两相流动长距离运输需求日趋增长。在实际运输过程中, 一些有害流型会造成输运管道的结垢和腐蚀, 或产生较大压降损耗。然而由于油水两相流动的流型多样, 各流型之间转换条件和机理研究不充分, 需加强油水两相流动流型研究, 在工程实践中控制流型, 避免有害流型的发生, 以达到保护管路, 节约能源的目的。

油水两相流属液液两相流范畴, 它的研究进展远远落后于气液两相流、气固两相流及液固两相流, 在国内尚未见有关液液两相流研究的专著^[1]。国际上关于油水两相流动研究始于 20 世纪初, Isaac 和 Speed 研究了水环输运稠油的方法。此后从 20 世纪 60 年代起, Charles、Russel 等学者不断扩展和推进“水包油”环状流的研究, 观察其流型和压降, 并

认为以此流型运送原油有利于达到减阻的效果^[2-3]。1995年, Talsa大学的 J.L.Trallero 等^[4]在总结了已有研究的基础上, 在直径 50.13mm 的丙烯酸树脂管道上进行实验, 对水平管道中的油水两相流动流型进行了基本的划分。针对分层流和分散流两大类, 前者具体细分: 界面清晰的分层流(ST)和界面混合的分层流(STMI), 后者具体细分: 水包油(o/w)、上层油包水下层水包油(D w/o & D o/w)、上层水包油下层水(D o/w & w)以及油包水(w/o)流型。其后, 又有 M.Nadler、P.Angeli 等^[5-6]进行了水平管内油水两相流动实验, 对 Trallero 的流型划分进行了补充, 定义了水层上的双层分散流(D w/o & D o/w & w)、上层油包水下层水(D w/o & w)以及三层流模型(3-Layer)。随后在 1992 年至 2002 年间, 以色列学者 N.Braune^[7]分析和总结了油水两相流机理, 将油水两相流动划分出了 20 种流型。

以上实验多采用钢管或有机玻璃管, 管道直径多为 0.3~10cm 范围内不等。对于流型的观察和识别方法以传统的肉眼识别和高速摄像方法为主, 其后也有学者引入了电导探针、 γ 射线等方法进行流型观察和识别。这些方法虽便于直接捕捉流型变化, 有利于流型观测, 但目测法和高速摄影法都需要透明管段或透明窗口, 实验或工程中时常受限, 而采用侵入式的测量手段对小管径管道流型结构有较大的破坏作用, 因而引入新的微侵入式或非侵入式的方法是今后测量的趋势。

因此本研究选用过程成像技术(industrial process tomography)作为一种流型识别和检测的主要方式, 利用其具有非侵入性的特点, 可以在不影响流体流动的前提下, 实现对管内的多相流体电导率的检测, 再重建图像判断管道内的流型。

2 实验装置和实验过程

实验于中国科学院力学研究所的多相流动实验平台上完成, 装置示意图和照片见图 1 及图 2。该实验所用有机玻璃管道内径 50mm, 全长约 20m。实验测试段距离管道入口处 3m, 保证流动充分发展和稳定。水相和油相分别由水泵和油泵提供, 并在流过实验管路之后经过油水分离器分离后返回油箱和水箱, 以便循环使用。实验所用水油两相工质参数见表 1。

表1 液相工质参数 (20℃, 0.101MPa)

| 液相 | 密度 (kg/m ³) | 表面张力 (N/m) | 黏度 (kg/ms) |
|-------------|----------------------------|---------------|---------------|
| 水 | 998.0 | 0.0712 | 0.001 |
| 矿物油 (白油) | 860.0 | 0.0445 | 0.048 |

实验共观察了 90 组不同工况的流型, 表观流速变化范围为: 水相 0.1~1m/s, 油相 0.1~

0.9m/s。每组实验先使用肉眼观察和拍照的方法进行流型预判，同时运用 ERTZ8000 设备，以及内径 50mm 管路配套的双圈传感器，每圈 16 个电极，采集各工况下各电极上的电导率分布。其后运用 SBP 反投影算法^[8]，借助 ITS Tomography 等软件进行处理得到各流型的图像重构，通过计算得到各工况下流动的实时相含率数据。

这套 ERT 设备有以下特点：① 图像采集速度快，可以达到 1000 帧/秒的速度，相比于肉眼识别方法，更有利于图像的捕捉和采集；② 相比于高速摄像方法，不要求管道透明，避免了高速相机单侧拍摄，管内构成显示重叠的影响；③ 当出现分层流动、弹状流等流型时，某些电极会失去与液相的接触。这里采用电阻环技术，保证仪器在电极断路时不致信号过载，依然能够进行图像采集，因此可以监测更多的流型。

实验中在测试段两侧各接入了一个压力传感器，两传感器间隔 1m，以测量不同的流动工况下压降随着表观流速的变化。首先用 U 型压力计标定压力传感器，拟合出获得压力传感器的电压值和实际压力的函数关系。随后针对每一种工况采集两个压力传感器处的电压值 U_1 和 U_2 ，并利用标定时得到的函数关系求出测试段入口处压力 P_1 和出口处压力 P_2 。计算 P_1-P_2 的值得到经过测试段的压降信息。

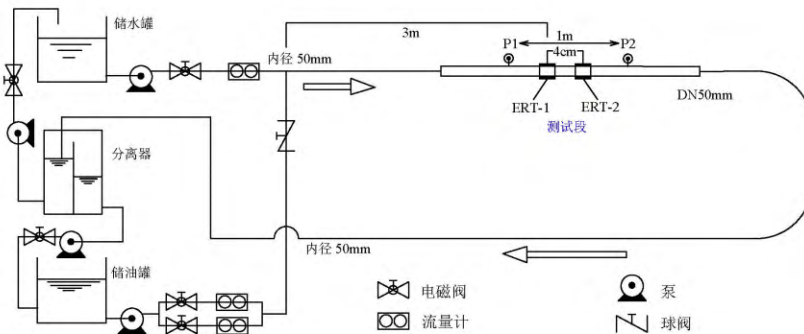


图 1 实验装置示意图

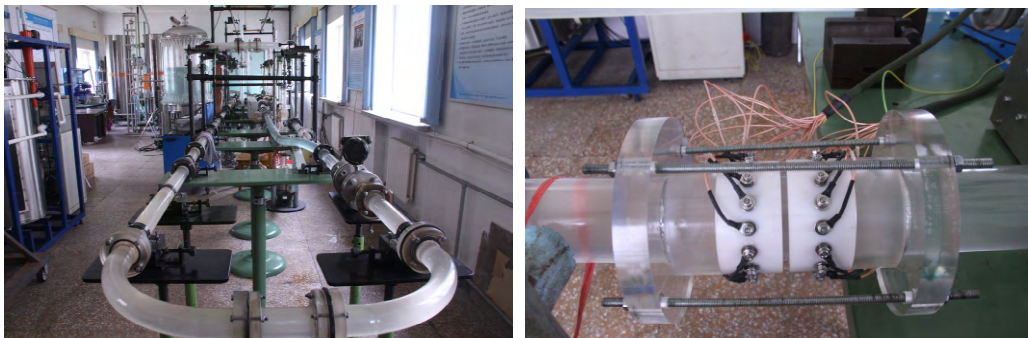


图 2 实验装置照片

3 实验结果和流型图

本实验中流型的定义结合了 Trallero 和 N.Braune 提出的流型划分, 观察到了六种流型, 即: ①上层连续油相, 下层连续水相, 分界面清晰的分层流 (ST); ②上层连续油相, 下层连续水相, 分界面混合的分层流 (STMI); ③油包水 (w/o); ④上层油包水, 下层水包油的分散流 (Dw/o & Do/w); ⑤上层水包油, 下层水的分散流 (Do/w & w); ⑥环壁面为油包水分散流, 管中间为水包油分散流 (Dw/o annulus & Do/w core)。

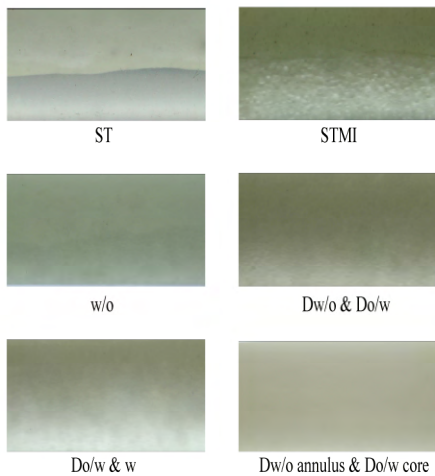


图 3 观测各流型管道拍照

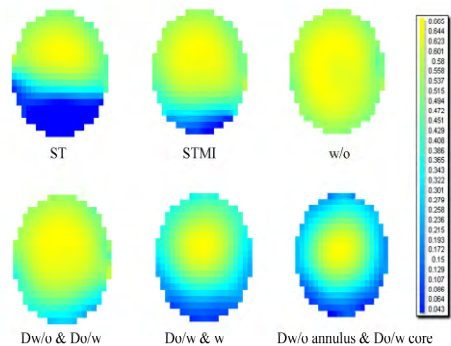


图 4 观测各流型 ERT 成像图

图 3 以照相形式展示了六种流型在管道中的真实流动情况。可见在分层流的范围内以肉眼观察和拍照方式观察流型简单直接, 而在高流速区域往往出现复杂的分散流、环状流流型, 使用肉眼观察或拍照摄像通常难以清晰全面地反映流型信息。图 4 为这六种流型在 ERT 中以相含率形式表现出的图像。通过和颜色条对照可以读出油相含率, 进而可得到在管截面内每一点处油水两相的分布情况。图像中纯蓝色部分 (黑白打印时为深色) 为纯水, 此时油相含率最低, 由纯蓝色颜色变浅至绿色, 最终变浅为黄色 (黑白打印时为浅色) 表示油相含率逐渐增加至油相连续主导。

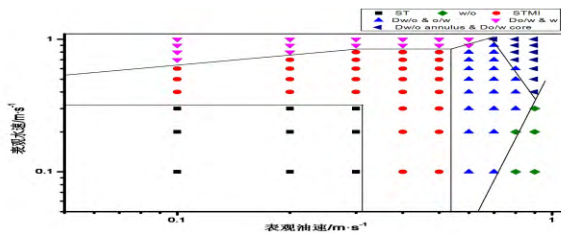


图 5 50mm 管径油水两相流型图

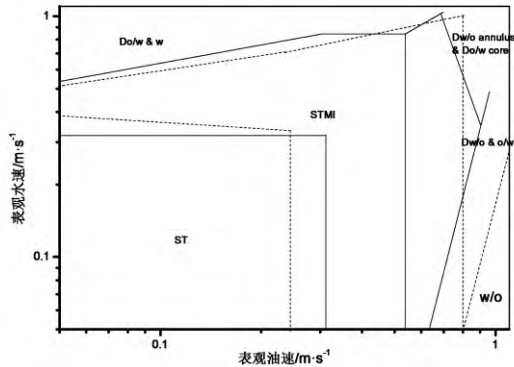


图6 与 Trallero (1995) 水平管油水两相流型图对比
(其中虚线为 Trallero 实验流型图, 实线为本次实验流型图)

图 5 给出了在该实验条件下得到的流型图, 横轴表示入口处油相表观流速, 纵轴表示入口处水相表观流速。实验表明, 当表观流速较低时, 由于重力作用流动呈现边界光滑的清晰分层 (ST)。在油水表观流速都为 0.1m/s 左右的流动时出现了波浪式长波, 其后随着流速增加, 波浪的波高逐渐减小。继续增大水速, 分界面处两种流体以液滴形式相互侵入, 两相分界面变得模糊 (STMI), 随着流速的进一步增加, 分界面附近的液滴数量不断增加。

当流动突破了分层流的范畴, 在低水速条件下进一步加大油速, 会出现上层油包水, 下层水包油的流型 (Dw/o & Do/w)。进一步增大油速, 当油速大于 0.8m/s 时, 则出现油包水 (w/o) 流型。这两种流型都只能出现在油连续区域。类似的, 若进一步增大水速, 当水速大于 0.3m/s 时, 出现上层水包油, 下层水的流型 (Do/w & w), 而在水速和油速都接近 1m/s 的区域, 则会出现环壁面为油包水分散流, 管中间为水包油分散流 (Dw/o annulus & Do/w core)。

图 6 给出了本次实验所得流型图和 1995 年 Trallero 同样用内径 50mm 的有机玻璃管实验所得流型图的对比。由于 Trallero 实验中所用的矿物油与水的黏度比为 29.6 , 而本实验所用的矿物油与水的黏度比为 48 , 油的黏度增大, 导致流动能够在更大区域内以边界清晰地分层流 (ST) 流型流动, 同时导致上层油包水下层水包油流型提前出现。

4 表观流速对于压降的影响

压力传感器使用前需使用 U 形压力计进行标定。通过计算和函数拟合, 得到传感器的电压值 x 和实际压力 y 满足: $y=24431.68x + 77337.91$ 的关系, 因此通过测得的电压值求出实际压力值。在每组实验中针对固定水速, 调节油速不断增大, 通过计算两采集点压力之差, 得到不同工况下管内两测试点压降值 (图 7)。

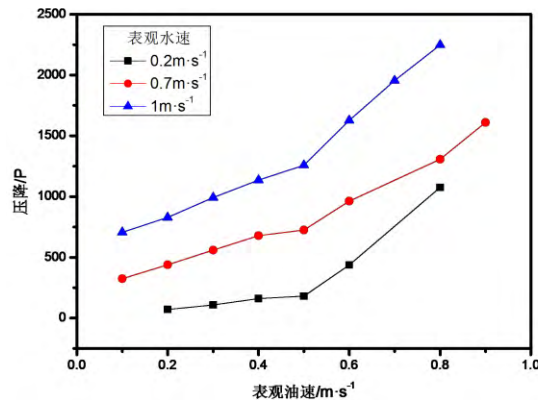


图7 不同水速测试段压降随表观油速变化

图7表明在不同的表观水速条件下，测试段两端压降随表观油速的升高而递增。压降同样在低油速的分层流动过程中增加较为平缓，而随着油速的增加，压降的增加逐渐加快。

5 小结

本研究介绍了用电阻层析成像（ERT）技术检测水平有机玻璃管中油水两相流动流型的方法。结合传统的目测法和拍照摄像方法分析对比，整理得出50mm管径两相水平流动流型图，并借助压力传感器得到两相流动管道压力和测试段两端压差随表观流速的变化情况，得出结论：

电阻层析成像技术（ERT）能够通过实验测得截面电导率，计算得到截面相含率，用于进行两相流的流型识别。通过分析相含率图像，划分出六种流型，并和已有的流型识别划分进行对照，验证了ERT技术在两相流研究中的应用的可行性。同时测试段两端的压差在一定水速下随着油速的增加而逐渐增加。

参 考 文 献

- [1] 陈杰, 孙红彦, 等. 水平管内油水两相流流型的实验研究[J]. 油气储运, 2000, 19(12): 27-31.
- [2] Charles, M. The reduction of the pressure gradients in oil pipelines[J]. Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy, 1960, 67.
- [3] Ressel Charles, M. The effect of the less viscous liquid in laminal flow of two immiscible liquids[J]. Canadian Journal of Chemistry, 1959, 2.
- [4] Trallero J L, BRILL J P. A study of oil-water flow patterns in horizontal pipes[J]. SPE Production & Facilities, 1997, 12(3): 165-172.
- [5] Nadler M, Mewes D. Flow induced emulsification in the flow of two immiscible liquids in horizontal pipes[J]. International Journal of Multiphase Flow, 1997, 23.
- [6] Angeli P, Hewitt G F. Pressure gradient in horizontal liquid-liquid flow[J]. International Journal of

- Multiphase Flow, 1998,24.
- [7] Brauner N, Moalem Maron. Flow pattern transitions in two-phase liquid-liquid flow in horizontal tubes[J]. Int. J. Multiphase Flow, 1992, 18(1): 188-140.
- [8] Kotre, C.J.,(1994), EIT image reconstruction using sensitivity weighted filtered back-projection[J], Physiol. Meas., 15, A, pp: 125-136.

A study of oil/water flow pattern using electrical resistance tomography technology

HUANG Yu-tong, LI Hua, MA Nai-qing, WANG Shu-jing, WU Ying-xiang

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100190

Email: lihua@imech.ac.cn)

Abstract: The issue of flow pattern occupies an important position in the study of multi-phase flow research, while the study of flow's turning point possesses a high academic value. However, the research of this study is difficult as its influencing factors are obscure, and its detecting approaches needs to be improved. In this paper, ERT(electrical resistance tomography)technology and pressure sensor were applied for the study of oil/water flow, and flow pattern map was made after the data analysis and image reconstruction. Mineral oil and water were used as media and the experiment was carried out in a 50-cm inside diameter \times 20m long plexiglass pipe. The Electrical Resistance Tomography (ERT) system with 16 electrode in single section were used with pressure sensor applied on the pipe, to detect different flow patterns caused by changing the superficial velocity of oil and water phase. By detecting the change of voltage, ERT technology reconstructs the conductivity distribution within the cross section using back-projection method, and to learn the phase distribution with visualization measurement. At last, to draw a flow pattern map with the curve of the transform boundary. Compare it with former flow pattern map thus provide support for deeper flow pattern research.

Key words: Oil/Water two phase flow, Horizon, ERT, Flow pattern map