

研究论文

螺旋管内油—水液液两相流流型*

李广军 郭烈锦 高 晖 于立军 黄建春 陈学俊
(西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 西安 710049)

摘 要 在两种不同放置位置螺旋管内进行了油—水液液两相流流型的实验研究, 定义了各种不同流动条件下油—水两相流的流型, 给出了螺旋管内液液两相流的流型图. 进而讨论了各流型之间转变的机理, 并考察了螺旋管结构尺寸及放置方式对油水两相流流型及相转变特性的影响.

关键词 螺旋管 油—水液液两相流 流型

中图分类号 TQ 016.1

引 言

螺旋管由于具有优越的结构特性、高换热效率、自生离心力场和二次流等特点, 在动力、化工、石油及核工业等领域得到广泛应用. 在原油地面集输过程中经常使用螺旋管中间加热器, 以实现减阻和提高后续工艺的分离效率. 尽管两种互不相溶液体的混合流动在化工、石油工业屡见不鲜, 管内空气—水、油—气或蒸汽—水气液两相流流型、阻力已被广泛研究^[1~4], 但有关螺旋管内油水液液两相流流型的研究在国内外至今未见报道. 本文对立式、卧式螺旋管内油水液液两相流流型及其相转变特性进行了实验研究.

1 实验系统与装置

实验在西安交通大学多相流国家重点实验室油气水砂多相流实验台^[1,2]上进行. 实验段包括3个管圈(如图1所示), 由内径为39 mm的有机玻璃管弯制而成. 卧式螺旋管直径(D_1 和 D_2)分别为265 mm和522.5 mm, 长度分别为5320 mm和6760 mm. 立式螺旋管直径 D 为265 mm, 长度为4490 m. 螺旋节距均为30 mm. 实验中流量、压力、温度等测量信号都利用IMP板引入IBM兼容机进行监视、记录. 流型通过观察法及差压信号分析获得. 实验中油的折算速度范围为 $0.04\sim 0.91\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 水的折算速度范围为 $0.018\sim 1.80\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. 含水率为 $0.02\sim 0.976$. 实验油品为46号机械油,

水为自来水.

2 实验结果与流型图

2.1 流型的分类

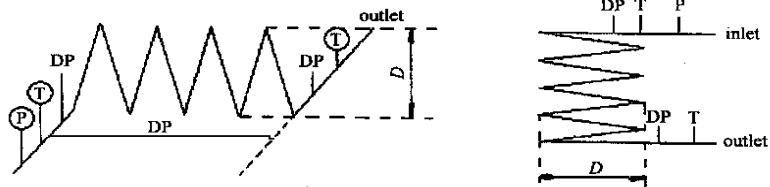
卧式螺旋管内液液两相流的流动十分复杂, 由于重力和离心力的联合作用, 使得两相流的流型随螺旋管周角的增加而变化. 即使在同一流工况下, 不同周角位置处的流动特征也有差异. 根据多次实验观察, 卧式螺旋管内的流动在第2圈后, 各圈同一周角处的流型基本相同. 相同流动工况下不同螺旋周角处的流型虽然存在差异, 但各周角处典型流型的基本特征基本相同. 立式螺旋管内液液两相流流动特性比卧式螺旋管简单得多, 在整个流动过程中, 由于重力和离心力的夹角不变, 使得立式螺旋管中, 除第1圈的流动受入口效应影响较大外, 其余各管圈的流动状态基本一致, 且在每圈不同周角位置处的流动特征也差别不大. 本文结果指的是螺旋管第2圈以后的情况. 根据观察, 本实验条件下卧式、立式螺旋管中油水液液两相流共出现以下几种流型, 如图2所示.

(1) 分层流(ST) 这种流型发生在油水混合物流速较低的流动工况, 以油水两相分层且均具有连续液膜为判据. 由于两相密度差, 油相在管道的偏上(内)部、水相在管道的偏下(外)部流动. 这种流型还包括以下两种情形: ①较低两相流速下, 油水两相有明显的分界面, 界面处两相没有混合. 据实验观察, 在本实验参数范围内, 这类分层流型皆为波状分层流, 界面波表现为长波. ②油水两相虽然存在连续分界面, 但由于混物流速增大, 油相受到较大扰动, 使得油水连续界面附近水相中存在大小不一的近球形油滴, 随流速增大,

1998-08-04 收到初稿, 1998-09-20 收到修改稿.

联系人: 郭烈锦. 第一作者: 李广军, 男, 32岁, 博士, 讲师.

* 国家自然科学基金资助项目(No. 59576040 和



(a) horizontal helically coiled tube
 ($D_1=265$ mm, $L_1=5320$ mm;
 $D_2=522.5$ mm, $L_2=6760$ mm)

(b) vertical helically coiled tube
 ($D=2650$ mm, $L=4490$ mm)

Fig.1 Schematic diagrams of test sections
 P—pressure; T—temperature; DP—pressure drop

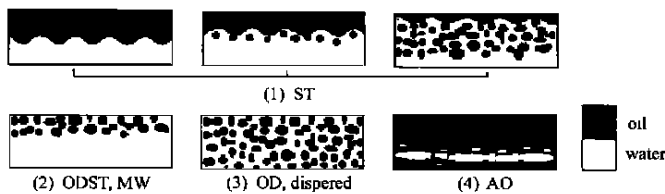


Fig.2 Classifications of flow pattern in helically coiled tube

界面附近水相中油滴增多，尺寸变小，而纯水或油的连续相层厚度减小。

(2) 油滴分层流 (ODST) 这种流型发生在混合物含水量较大的情况下，油呈离散滴状存在于连续水相中，由于浮力影响，油滴均积聚在管道的偏上部流动，水呈连续相在偏下部流动。此即 Arirachakaran 等所定义的混合分层流 (Mixed MW, 水为连续相)^[5]。

(3) 分散油滴流 (OD) 这种流型发生在混合物含水量更大、流速更高的情形下，油相呈油滴均匀地分布在连续的水相中。此即 Arirachakaran 等所定义的分散均匀流 (Dispersed)^[5] 和 Govier 等在垂直管内定义的油泡状流 (Oil bubbles)^[6]。

(4) 油环流 (AO) 这种流型发生在油流量较大、水流量较小 (即含水率较小) 的情况下，油以环膜连续贴管壁流动，水在管子中心流动。

研究表明：当油水两相的流量均足够小且处于层流状态，流动为光滑分层流；随着相流量增大，油水界面上出现波长较大的界面波，界面波的产生由 Kelvin—Helmholtz 不稳定性引起^[7,8]。继续增大流量，紊流扰动增强，部分油相离散成油滴，连续相的油逐渐转变成离散相的油，当系统中油相均为离散油滴时，则完成了分层流向油滴分层流的转

变，由于受浮力影响，油滴在管道的上部流动。分层流向油滴分层流转变的力学特征可以描述为水相紊流应力、表面张力和浮力共同作用的结果。进一步增大流速，离散油滴所受紊流应力足以克服浮力使得油滴在管道横截面上的分布趋于均匀，流动转变成分散油滴流。当混合物中油含量足够大时，油相沿管壁圆周形成环膜成为连续相，水相则以连续相和分散相存在于油环之中，此为油环流。

本实验中没有观察到水环的油水两相流流型。这主要是因为本实验所用油品的黏度不够大，不足以在水环环状流环境下维持一个稳定的油内核^[9]。

2.2 流型图

图 3 以油水混合物中体积含水量分数 ϵ_w 为横坐标、油水混合物流速 v_m 为纵坐标给出了立式螺旋管内油水液液两相流流型的实验结果。图中直线 1 为本文所得的油水相转变实验曲线，虚线为文献 [5] 在 0.0254 m 和 0.0381 m 水平直钢管内得到的油水两相流流型实验结果，曲线 2 为文献 [5] 得到的油水相转变曲线，在水平直管中虚线以下为分层流，虚线以上曲线 2 左边为油包水各流型、右边为水包油流型。

卧式螺旋管由于流体所受重力与离心力的夹角随螺旋周角不同而变化，不同螺旋周角处油水两相

流的流型也有差异。但实验观察表明，螺旋管不同周角处油水两相流流型的宏观类型基本相同，并且油水相转变特性也基本一致。图 4 给出了某一流工况下水油两相在卧式螺旋管内随螺旋周角变化的典型结果。为便于与水平管及立式螺旋管内油水两相流的流型比较分析，本文给出了卧式螺旋管出口水平段的实验结果，如图 5、图 6 所示。图中同样给出了文献 [5] 的实验结果（图中虚线所示，其含义同图 3）。

3 结果与讨论

分析比较图 3、图 5、图 6，可得如下几点结果。

(1) 在本文实验条件下卧式和立式螺旋管内油水两相流的流型类型相同，存在分层流、油滴分层流、油滴流和油环流 4 种流型，且与文献 [5] 在水平管得到的两相流类型基本相同。但螺旋管内各流型之间的转变界限与水平管内的结果有很大的差

别。在相同含水率条件下，螺旋管中发生分层流、油滴分层流、油滴流和油环流所需要的混合物流速比水平管要小得多。

有关液液两相流流型的研究报道虽然很多，但由于影响因素复杂，它不仅受工质物性、管道几何形状等因素的影响，而且还受流动中相转变特性等过程因素的影响，所以目前还未获得一个统一的结论。不同研究者所得到结论间差别还较大，有必要对之进行更深入的研究。

(2) 液液两相流中相转变点的确定是预测油水分散体系设计的关键参数，有关的研究还很不统一^[5,9,10]。一般认为影响液液两相流中相转变机理的因素是注入水量分数、油的黏度、混合物流速、液滴尺寸及其分布、流型以及管道形状。由于在转相点或靠近转相点油水混合物的黏度有明显变化，从而使得油水两相系统压力损失急剧增大，因此为了系统的安全运行，对之进行系统深入研究十分

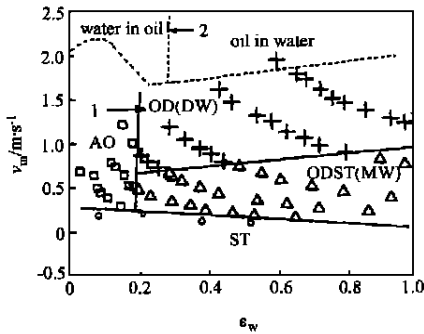


Fig.3 Flow pattern map of oil-water two-phase flow in vertical helically coiled tube ($D=265\text{ mm}$)
○ ST; □ AO; △ ODST; + OD

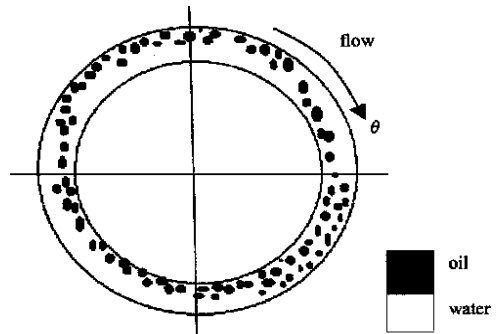


Fig.4 Flow pattern description along helically coiled tube in one circle ($D=265\text{ mm}$)
($j_o=0.0659\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $\epsilon_m=0.783$)

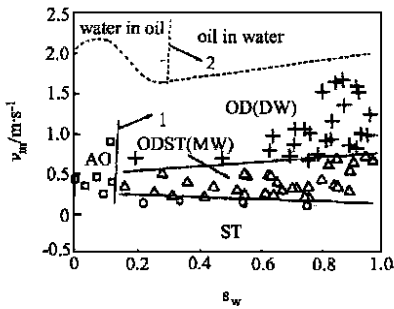


Fig.5 Flow pattern map of oil-water two-phase flow at horizontal outlet in horizontal helically coiled tube ($D=265\text{ mm}$)
○ ST; □ AO; △ ODST; + OD

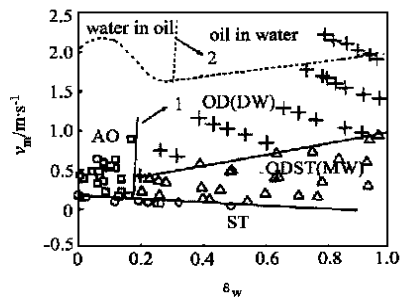


Fig.6 Flow pattern map of oil-water two-phase flow at horizontal outlet in horizontal helically coiled tube ($D=522.5\text{ mm}$)
○ ST; □ AO; △ ODST; + OD

必要.

本实验条件下,螺旋管中发生油水相转变所需要的含水率在 0.2 以下,均比水平管中的结果小.这种结果的出现可能有以下两方面的原因.一是实验用油品的物性不同,特别是油品的黏度对相转变的含水率影响较大.一般认为增加油的黏度会使相转变所需要的含水率减小^[5,9].本实验用油在 21℃时的静黏度为 0.124 Pa·s,而文献 [5] 所使用的油品静黏度为 0.084 Pa·s.二是由于流动管道结构不同所致.螺旋管由于存在垂直于主流方向的二次流,同样流量下流动的紊流度比直管要大,使得油相容易离散而水相容易聚积连通,从而在较小的含水率下就发生油包水向水包油的相转变.

(3) 管圈结构尺寸对各流型之间的转变及相转变条件有一定影响(图 5、图 6).螺旋管圈直径越小,分层流和油滴流范围相对较大,发生相转变所需要的含水率较小.螺旋管的不同放置位置对流型和相转变特性的影响可以比较图 3、图 5 得到.因为卧式螺旋管中混合物的扰动比立式螺旋管大,所以卧式螺旋管相转变时的含水率比立式螺旋管小一些.

符 号 说 明

- D——螺旋管螺旋直径, m
- j ——流速, $m \cdot s^{-1}$
- L——管道长度, m
- v ——速度, $m \cdot s^{-1}$

- ϵ ——某相的体积含量
- θ ——螺旋管周角, (°)

下角标

- m——混合物
- o——油相
- w——水相

References

- 1 Guo Liejin(郭烈锦), Li Guangjun(李广军), Chen Xuejun(陈学俊). Journal of Engineering Thermophysics(工程热物理学报), 1996, 17(4): 472-476
- 2 Guo Liejin(郭烈锦), Chen Xuejun(陈学俊), Zhou Fangde(周芳德). Journal of Xi'an Jiaotong University(西安交通大学学报), 1990, 24(1): 17-24
- 3 Li Guangjun(李广军), Guo Liejin(郭烈锦), Chen Xuejun(陈学俊). Power Engineering(动力工程), 1997, 17(4): 28-32
- 4 Wang Yu(王昱). Research on the Flow Pattern Transitions of Oil-gas Two-phase Flow in Horizontal and Inclined Tube: [dissertation](学位论文). Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 1994
- 5 Arirachakaran S, Oglesby K D, Malinowsky M S, et al. SPE Paper(No. 18836), 1989: 155-165
- 6 Govier G W, Sullivan G A, Wood R K. The Canadian Journal of Chem. Eng., 1961, 4(1): 67-75
- 7 Li Guangjun(李广军). The Characteristics of Interfacial Waves of Gas-liquid Two-phase Flow in Pipes: [dissertation](学位论文). Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 1996
- 8 Taitel Y, Dukler A E. AIChE J., 1976, 22(1): 47-55
- 9 Chen Jialang(陈家琅), Tang Jiangning(唐江宁). The Reserving and Transporting Technologies for Oil and Gas in Abroad(国外油气储运), 1991, 9(4): 1-7
- 10 Cai Jiyong(蔡继勇). Research on the Flow of Air-Oil-Water Three Phase Mixture in a Circular Tube: [dissertation](学位论文). Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 1998

FLOW PATTERNS OF OIL-WATER LIQUID-LIQUID TWO-PHASE FLOW IN HELICALLY COILED TUBES*

Li Guangjun, Guo Liejin**, Gao Hui, Yu Lijun, Huang Jianchun and Chen Xuejun

(State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049)

Abstract In this paper an experimental research on the oil-water liquid-liquid two-phase flow patterns and their transitions in both horizontal and vertical helically coiled tubes is presented. The different flow patterns are defined and distinguished from each other according to the relationship between oil and water phase in the tubes. The flow pattern maps and phase inversion points are obtained and compared with the results in horizontal pipes. The effect of the dimensions and different locations of the helically coiled tubes on flow pattern transition and phase inversion point is also examined.

Keywords helically coiled tubes, oil-water liquid-liquid two-phase flow, flow pattern

* Supported by the National Natural Science Foundation of China (No.59576040 & No.59706013).

** To whom correspondence should be addressed.