A 辑第 23 卷第 6 期　　水 动 力 学 研 究 与 进 展　　Vol.23,No.6
2008 年 11 月　　CHINESE JOURNAL OF HYDRODYNAMICS　　Nov.,2008

文章编号：1000-4874(2008)-06-0702-07

水平分支管路中油水两相流动研究*

常英，许晶禹，吴应湘
(中国科学院 力学研究所 工程科学研究部, 北京 100190)

摘　要：该文研究了两种直径的直管油水两相流动对流型和相含率的影响和在不同管径的水平并行分支管路中的相含率变化规律。实验设备包括内径为 50 mm 的水平主管道和内径为 25 mm 的分支管路。得到了不同入口条件下实验管段的流型和相含率图。实验指出：管道的尺度变化对于流型的影响较小，但对于油水两相的相含率和速度滑移有显著的作用。当油水两相流在并行分支管路中同时流动时，随着入口处水的表观流速增大，并行主管的截面油含率与并行分支管的差距逐渐缩小。

关　键　词：分支管；油水两相流动；流型；相含率

中图分类号： O359　　**文献标识码**： A

Investigation on the oil-water two-phase flow in horizontal branch tubes

CHANG Ying ,　XU Jing-yu，WU Ying-xiang
(Division of Engineering Sciences , Institute of Mechanics ,
Chinese Academy of Sciences, Beijing　100190 , China)

Abstract：The flow characteristics of oil-water two-phase flow in parallel tubes were investigated in this paper. Experiment data were presented in the junction, which were horizontal with inlet and run diameters of 50mm (inside diameter) and branch diameter of 25mm (inside diameter). The flow pattern and the holdup were obtained from the present experimental data. It was shown that the change of pipe diameter exerted a remarkable effect on the oil holdup and the two-phase slippage velocity, but a small effect on flow patterns. When the oil-water two-phase flow passed simultaneously through the run tube and the bypass tube, the disparities between the oil holdup in the run tube and that in the bypass were narrowed with the increase of the superficial water velocity at the entrance.

Key words：branch tube; oil-water flow; flow pattern; holdup

* **收稿日期**：2007-07-17(2008-09-27 **修改稿**)
基金项目：国家自然科学基金,油气水三相分支管流的流动特性研究 (项目批准号 10572143)
作者简介: 常英(1984－),女,河北泊头人,硕士生.

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

1 引言

随着海洋石油资源的大力开采，如何以最低的能量消耗来输送尽可能多的原油和天然气，以及准确在线测量油气水多相流流量已成为现今石油工业中最受关注的问题之一。在海洋平台和海底管线的检测中，很难从单一的大管道中测量所有的流动参数，因此，人们尝试在主管中引出部分流量，通过直接测量分支管中的流动特征从而预测得到主管中的各相流动参数，使大直径管道多相流量测量变的简单。由于主管和分支管的不同尺寸，不同的连接方向及分支管的个数等都会对流动产生重要影响。所以，要想实现上述工作，就需要准确了解多相分支管流的流动特性。

通过国内外相关研究的回顾，可以发现：目前对于分支管路中多相流动的研究多集中于 T 型管[1-7]，例如，Seeger 等人（1986）在水平入口的 T 型管道中气液两相流的相分离情况。Ottens 等人（2001）气液两相流在水平 T 型管道内的流动分离情况。后来 Yang 等人（2007）对水平 T 型管中的液液（液相为煤油和水）两相流动的相分离和相含率进行了实验研究。王立洋等人（2008）对 T 型管中油水两相流动的相分离情况进行了数值模拟和实验研究。T 型管的一些结果已应用于工业上的多相分离技术。

另一方面对在并行管路中两相流动的研究大多集中于气液流动[8-9]。例如，Taitel 等人（2003）对在并行分支管路中气液两相流的流动分离进行了定性的研究。其中主管道直径是 54 mm，四个分支管径均为 26 mm。实验指出：在大多数情况下，在并行管水平放置时，气液两相流在四个管道中流动，靠近主管的两个支管中流动速度较快。

再如目前报道对油水两相流在并行管内流动的研究很少，发现一些对在微管道内的油水两相流动的研究[10-11]，例如，Hetsroni 等人研究了在并行微管路中两相流的流型。其中管道直径仅为 0.3 mm。由于尺度效应的存在，其研究成果不能应用于现有的石油工业。另外，目前研究的并行管的管径多数是相同的，到目前为止，尚缺乏对于不同管径的并行分支管内的油水两相流动的研究报告。

鉴于上述情况，本文通过实验对油水两相在主管和分支管中的流态相关关系，分支管与主管中相含率的配比规律与管流的流动参数之间的关系等几个方面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的多相流动实验平台上（见图2）完成的。实验运行原理如图1所示，整个流程主管线为内径50 mm的透明有机玻璃管。管线从出口到分离器长约35 m。实验段包括内径D为50 mm 的水平主管道和一个内径d为25 mm的分支管路。液相由水箱和油箱分别经过各自的供应系统（水泵和油泵）供应，油水两相流经实验管线后通过分离器分离后循环使用。水相流量计量采用电磁流量计，油相的计量为涡轮流量计，相含率的测量采用快关阀。流型识别采用高速摄像机记录油水流动状态，慢镜头回放观察流型。

实验用的液相介质物性如表 1 所示。其中水是自来水，油采用无色、透明的矿物油，俗称白油。纯白油表现出牛顿流体特性，而乳化后白油表现出非牛顿流体特性[12]。为便于实验时的流型观察，在水中加入了高锰酸钾（颜色剂）。

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
白油	860.0	0.0445	0.048

在实验过程中，给定水相流量后，调整油相流量，通过可视化观察实验段的油水两相流型，记录主管与分支管中的表观油相和水相流量。其中在相同入口条件的下，每个工况共测量三组流动实验：一是关闭分支管 c（见图 1），测量油水两相流在大管道中的流动数据；二是关闭主管道上的管 b，使流动只通过分支管 c，测量油水两相流在小管道中的流动数据；三是测量油水两相流在主管道和分支管道中同时流动，即管 b 和 c 同时放开时的流动数据。相含率的测量方法是在油水两相流动的同时快速关闭管 a、b、c 两端的快关阀，然后测量管 a、b、c 的截面相含率。管道中表观流速变化范围：油相：0～2 m/s，水相：0～2m/s。雷诺数（Re）变化范围：油相：0 ～ 2000；水相：0 ～ 100000。对每个试验段，记录管道的平均液相含率，平均表观流量和流型。共完成了 98 组实验。

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

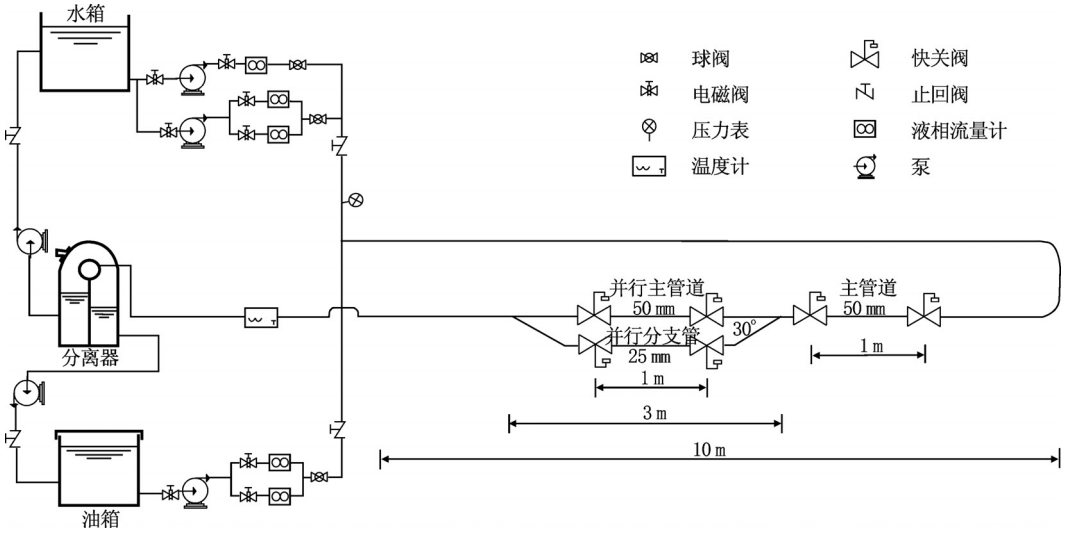

图 1 实验装置示意图

图 2 实验装置照片

3 实验结果与讨论

本研究中，流型的定义采用Trallel等人（1997）提出的方法[13]。利用可视化观察，依次观察到了4种流型（见图3），即：①分层流（ST）：上层为连续油相，下层为连续水相，油水分界面十分清晰、光滑，波动很小；②有混合界面的分层流动（ST & MI）：上层为连续油相，下层为连续水相，界面波动加快，波长变短，界面开始混杂，界面下面水相中的油滴大小不均，而且迅速滚动； ③上层水含油，下层为水（Do/w & w）：上层油相完全成为离散液滴分散在水连续相中，下层为游离水；④上层油含水，下层水含油的乳化混合流动（Do/w & Dw/o）：上层水成为离散液滴分散在油连续相中，下层为油相成为离散液滴分散在水连续相中，且油滴粒径很小，为乳化混合流动。

3.1 油水两相在单管内的流动

为了观察管道尺寸对流动的影响，在研究并行流动实验前，我们分别研究了油水两相流在两种直径的直管中的流动。图 4 是两种管径的油水两相流型图。将其与 1997 年 Trallel 等人得到的流型曲线进行了对比。对比可知管道直径的变化对于流态的影响比较显著，主要表现在大管径中油水两相流有混合界面的分层流动区域更广。而在小管道中同等情况下油水乳化混合更严重。

由于油水之间存在密度差，所以在油水两相混合流动时，油水两相间存在速度滑移，从而会造成截面相含率与入口相含率之间的差距。说明油水两相间速度滑移的方式有很多种，在这里，我们采用滑速比来表示油水两相间的速度滑移。滑速比 S 的计算公式为

$$S=\frac{\beta_o/\beta_w}{\varepsilon_o/\varepsilon_w} \qquad (1)$$

式中：β_o，入口油含率；β_w，入口水含率；ε_o，管道截面油含率；ε_w，管道截面水含率。

图 5 给出了两种管径的油水两相滑速比。可以看出对于大管径中的油水两相流动，当入口油水流

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

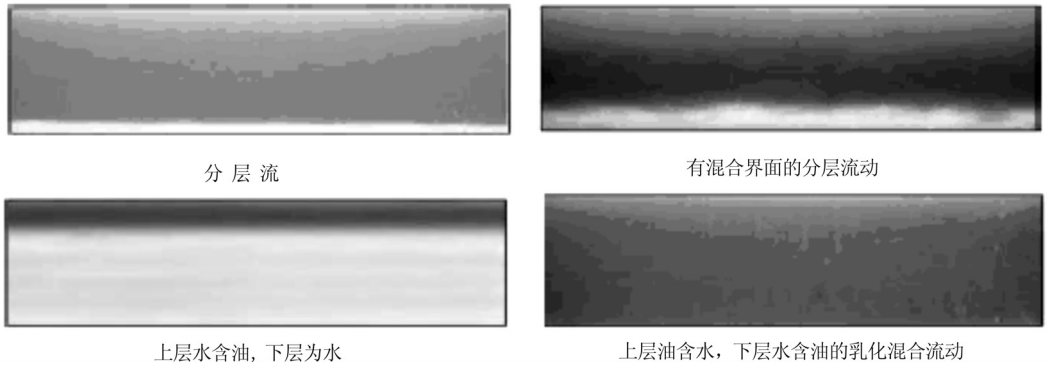

图 3 实验观测得到的流型图

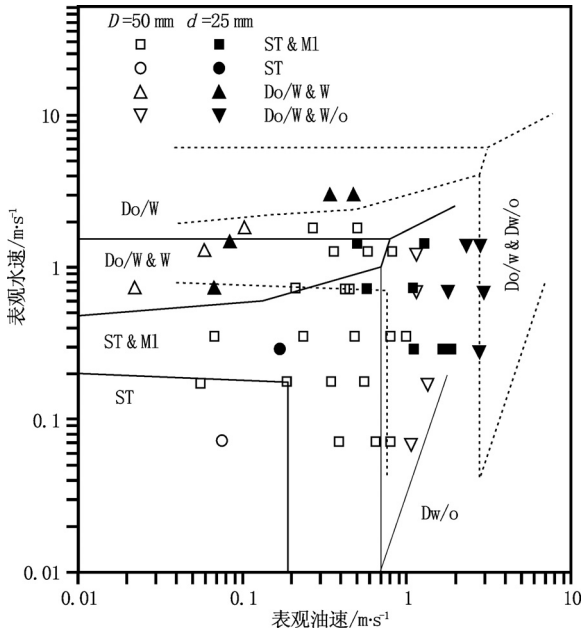

图 4 两种管径的油水两相流型图

（Trallel, et al（1997）实验工况：$\rho_o / \rho_w = 0.85$，$\mu_o / \mu_w = 29.6$，$D = 50\text{mm}$）

量比在 0.1 到 10 时，滑速比接近于 1，此时可忽略两相滑移；在入口油水流量比过高或过低时，管道内的油水两相速度滑差较大。经对比发现，管径的变化对两相滑移有显著的影响，管径的减小增加了油水两相的速度滑差。

图 6 给出了两种管径中截面油含率对比。可以看出，在大管径中的油水两相流动：处于中间的油含率，管道的截面油含率接近于入口的含率。在小管径中，管径的变化对截面油含率有显著的影响，即在所有工况下，截面油含率几乎均低于入口油含率。对比可知：同样入口流量下，小管径的截面油含率低于大管径。由此可见，管径的缩小使截面油含率随之减小。

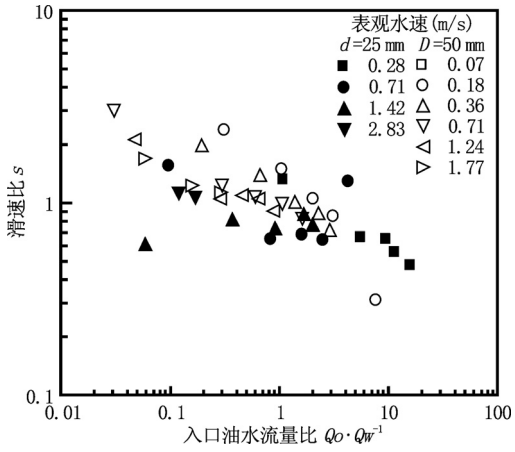

图 5 两种管径的油水两相滑速比

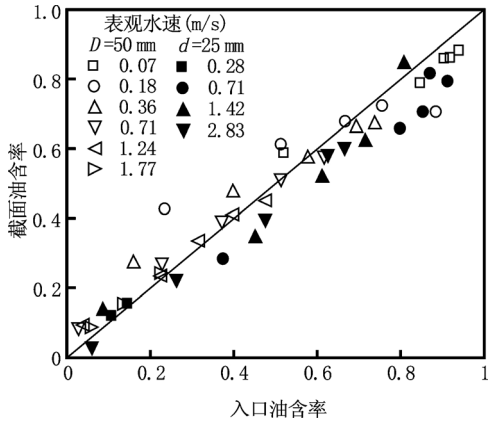

图 6 两种管径的截面油含率对比

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

3.2 油水同时在并行管道内流动

油水两相流在并行分支管路中同时流动时的流型与在直管中流动时的流型相似，因此流型图可以用图 4 代替。不同的是，随着流速的增加，明显可以观察到，油水两相流在并行主管道 b（见图 1）中流动速度较快，乳化优先发生在并行主管道中。这是由于并行分支管管径明显小于主管，且并行主管与主管道直接连通，油水两相流在通过并行管道时优先通过并行主管道，从而导致这种结果。同样的原因导致了截面油含率的变化。

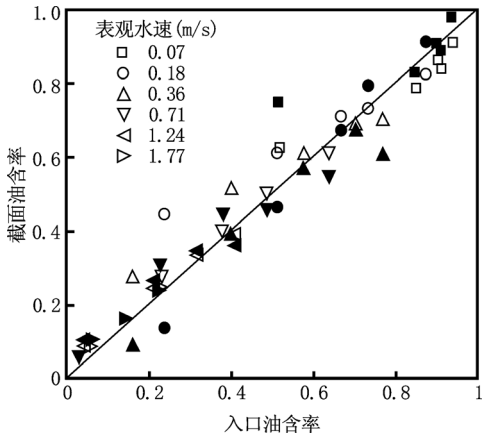

图 7 并行分支管的截面油含率对比

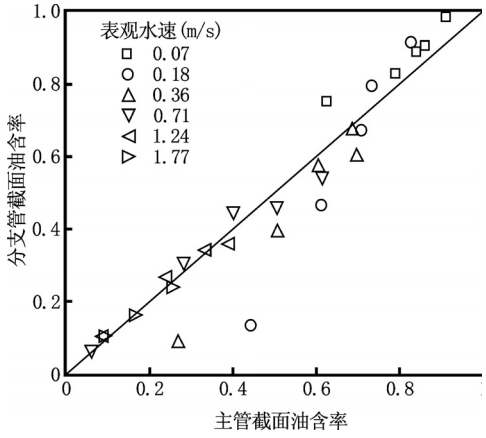

图 8 并行主管与分支管截面油含率对比

图 7 给出了油水两相流在并行分支管道内同时流动时截面油含率对比。将其与油水两相流在两种管径的直管中流动时的相含率变化（见图 6）进行比较，可以发现并行主管 b 的截面油含率变化与大管径中的变化相似，也就是说主管道与并行主管的截面油含率差距很小，与此同时，并行分支管 c 的截面油含率变化与小管径的相比差别显著。图 8 是并行主管与分支管的截面油相含率对比。可以看出，随着水的表观流速增大，两管的截面油含率逐渐减小。另外，在水的表观流速很小（0.07 m/s）时，并行分支管 c 的截面油含率稍大于并行主管 b。随着水的表观流速增大，并行主管的截面油含率与并行分支管的差距在逐渐的缩小。当水的表观流速达到 0.71 m/s 以后，并行主管与分支管道的截面油含率已基本相同。

4 截面油含率 ε_o 的计算

为了计算当油水两相分离流动时，即流型为分层流（ST）和有混合界面的分层流（ST & MI）时的截面油含率，结合本文研究和前人报道的油水两相流在直管中流动时得到的数据[14-19]（共约 130 组数据），相关参数如表 2 所示，经分析可知，管道的截面油含率 ε_o 与入口油水流量比 q 可能存在某种函数关系，即：

$$\varepsilon_o = f(q) \tag{2}$$

式中：$q = Qo/Qw$（Qo：入口油的流量；Qw：入口水的流量）。

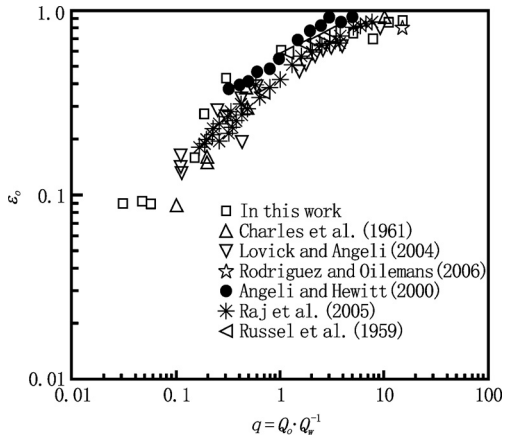

图 9 ε_o 与 q 的线性关系

我们把相关数据进行了整理，结果显示：在对数坐标下，截面油含率 ε_o 与入口油水流量比 q 满足一定的线性关系（如图 9 所示）。由此我们预测二者间满足关系式：

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 2：引用数据的相关参数

水的表观流速 u_{sw} (m/s)	油的表观流速 u_{so} (m/s)	密度比 ρ_o/ρ_w	黏度比 μ_o/μ_w	管径 D (m)
0.01～3.5	0.01～3.5	0.787～1	1.43～48	0.024～0.152

$$\varepsilon_o = A\cdot e^{(B\cdot q)} + C \quad (3)$$

式中：A，B，C 为待定常数。

经过数据回归，我们得到如下经验关系式，

$$\varepsilon_o = 0.832 - 0.688\cdot e^{(-q/1.517)} \quad (4)$$

图 10 为截面油含率 ε_o 的计算值与实验值对比。可以看出，误差基本控制在±20%以内，满足工程上要求的精度。需要强调的是，此经验公式的适用范围是油水流量比 q 在 0.1～0.9 之间，在此范围内油水两相流的流型恰为分层流和有混合界面的分层流。因此，应用上述经验公式（4）根据入口油水流量比 q 来计算截面油含率 ε_o 是可行的。

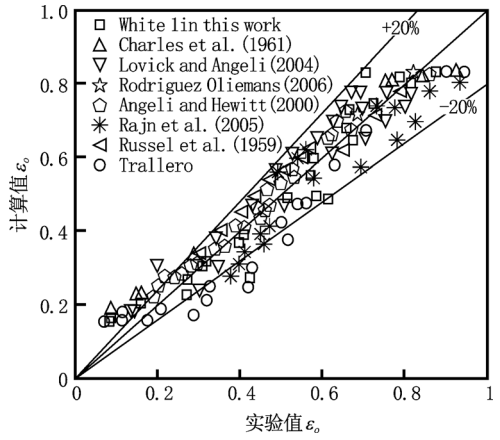

图10 ε_o 的预测值与实验值对比

5 结论

本文研究了两种直径的直管中油水两相流动对流型和相含率的影响和在不同管径的水平并行分支管路中的相含率变化规律。从以上实验结果分析，可以得出如下结论：

1. 对于两种直径的直管中的油水两相流动，尺度效应主要表现在：在同样流量下，管径的缩小使油水两相流更易于乳化，并且增加了油水两相的速度滑差，从而管径的缩小使截面油含率减小。本文所研究的两种管径比值为 1:2，其所得结果对于此比值的平行管内油水流动具有一定的借鉴作用。

2. 当油水两相流在并行分支管路中同时流动时，由于并行分支管管径明显小于主管，且并行主管与主管道直接连通，油水两相流在通过并行管道时优先通过并行主管道，从而使得乳化优先发生在主管道；并且随着水的表观流速增大，并行主管内的油含率与并行分支管的差距在逐渐的缩小。最后，分支管与主管的截面相含率几乎相同。

3. 当油水两相流的流型为分层流和有混合界面的分层流时，得到了管道截面油含率 ε_o 与入口油水流量比 q 的经验公式。计算值与实验值的误差基本控制在±20%以内，满足工程上要求的精度，可用于工程计算。

参 考 文 献：

[1] SEEGER W, REIMANN J and MÜLLER U. Two-phase flow in a *T*-junction with a horizontal inlet. Part I: Phase separation [J]. International Journal of Multiphase Flow, 1986, 12: 575-585.

[2] OTTENS MARCEL, HOEFSLOOT HUUB C J and HAMERSMA PETER J. Transient gas-liquid flow in horizontal T-junctions [J]. Chemical Engineering Science, 2001, 56: 43-55.

[3] YANG L, AZZOPARDI B J. Phase split of liquid–liquid two-phase flow at a horizontal T-junction [J].International Journal of Multiphase Flow, 2007, 33: 207-216.

[4] 廖振强. 多分支管道若干流动现象和特性的探讨[J]. 气动实验与测量控制，1996, 10(3): 3l-39.
LIAO Zhen-qiang. Investigati on of several phenomena and properties of the flows in manifolds [J]. A Erodynmic Experiment and Measurement & Control, 1996,10(3):3l-39.

[5] 吴伟, 严忠民. 多分支管道若干流动特性研究[J]. 河海大学学报, 2004, 32 (3): 272-275.

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

WU Wei and YAN Zong-min. Investigation on flow characteristics in manifolds [J].Journal of Hohai Univercity, 2004, 32 (3): 272-275.

[6] 陈杰, 于达, 严大凡. 油一水两相流流型转换研究[J]. 水动力学研究与进展, A辑, 2003, 18(3): 355-364.
CHEN Jie, YU Da and YAN Da-fan. Study on pattern transition of oil-water pipe flow [J]. Journal of Hydrodynamics, Ser. A, 2003,18(3):355-364

[7] WANG Li-yang; WU Ying-xiang; ZHENG Zhi-chu, et al. Oil-water two-phase flow inside T-junction [J]. Journal of Hydrodynamics Ser.B, 2008, 20(2): 147-153.

[8] TAITEL YEHUDA, PUSTYLNIK LUDMILA, TSHUVA MOSHE, et al. Flow distribution of gas and liquid in parallel pipes [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2003, 29: 1193–1202.

[9] MINZER URI, BARNEA DVORA, TAITEL YEHUDA. Evaporation in parallel pipes—splitting characteristics [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2004, 30: 763–777.

[10] HETSRONI G, MOSYAK A, SEGAL Z, et al. Two-phase flow patterns in parallel micro-channels [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2003, 29: 341–360.

[11] WU H Y, CHENG PING. Boiling instability in parallel silicon microchannels at different heat flux [J].International Journal of Heat and Mass Transfer, 2004, 47: 3631–3641.

[12] NÄDLER M, MEWES D. Flow induced emulsification in the flow of two immiscible liquids in horizontal pipes [J] . International Journal of Multiphase Flow, 1997, 23: 55-68.

[13] TRALLERO J L, INTEVEP S A, SARICA C et al. A study of oil-water flow patterns in horizontal pipes [R]. SPE36609,1996.

[14] CHARLES M E, GOVIER G W, HODGSON G W. The horizontal pipeline flow of equal density oil–water mixture [J]. Canadian Journal of Chemical Engineering, 1961, 39: 27–36.

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

[16] RODRIGUEZ O M H, OLIEMANS R V A. Experimental study on oil–water flow in horizontal and slightly inclined pipes [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2006, 32: 323–343.

[17] ANGELI P, HEWITT G F. Flow structure in horizontal oil-water flow [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2000, 26: 1117-1140.

[18] RAJ SUNDER T, CHAKRABARTI D P, GARGI DAS. Liquid-liquid stratified flow through horizontal conduits [J]. Chemical Engineering and Technology, 2005, 28: 899-907..

[19] RUSSELL TW F, HODGSEN G W, GOVIER G W. Horizontal pipeline flow of mixtures of oil and water [J]. Canadian Journal of Chemical Engineering , 1959, 37: 9-17.

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net