

# 分岔管路内的油水相分布特性研究

张军, 吴应湘, 王立洋, 史仕荧, 唐驰

(中国科学院力学研究所, 北京, 100190)

**摘要:** 分岔管路作为一种新型管式分离部件已经在油田上得到了初步应用, 与沉降罐和卧式分离器等传统分离设备相比具有分离效率高、体积紧凑、压降损失小等优点。不同入口条件和运行工况下, 多相介质在分岔管路内的相分布特性对其分离性能和流动特性有显著的影响, 目前这方面的研究还需深入和完善。本研究通过室内实验观察了分岔接头和分支管路内的相分布情况, 采用 VOF 模型中的 PLIC 方法对分岔管路内的油水相界面进行了数值重构, 计算中考虑了混合流速、相含率和流量配比等参数的影响, 模拟结果与室内实验符合较好。计算发现, 油相在分岔接头和分支管路内发生了明显的拉伸、破碎和变形等现象, 在较低的混合流速和相含率情况下油水两相可以得到更为有效的分离, 流量配比是影响相分布的最重要的运行参数, 这些结论对于指导分岔管路这种新型管式油水分离设备的现场试验具有重要的意义。

**关键词:** 多相分离; 油水两相流; 分岔管路; 数值模拟

## 1 引言

管路运输是石油、化工行业最主要的介质输送手段, 陆上油田和海上油田一般都是通过复杂的管网系统对油气资源进行输送的。在这些管网中, 存在着大量如图 1 所示的分岔管路, 以及由它构成的结构更为复杂的复合型分岔管路。当管路内为多相介质如原油和水、天然气和凝析液、或者油气水三相共存时, 在分岔接头处流量、相含率和相分布等会发生明显的变化, 宏观上表现为多相流型和压降损失的差异, 从而对管网系统的流动控制、动力匹配以及配套的处理设施等造成显著的影响。

同时, 分岔管路内的流量和相分配不均现象也可用于多相分离作业。例如, 在力学所应用流体实验室研发的新型复合式油水分离器中, T 型分岔管路(图 2)是核心部件之一, 对提高分离性能起到了重要的作用。由于这种分离部件结构紧凑、安装维护简便、压降损失小、分离效果好, 因此可以独立或与其他分离部件组合使用, 对现有的分离设施进行升级改造, 以增大处理量或者提高分离性能等。2008 年 9 月份, 在南海 LF13-1 平台开展的现场试验中, 课题组利用 T 型分岔管路和柱形旋流器成功地将排海污水中的含油率降至  $16.0 \times 10^{-6}$  以下, 并可显著减少破乳剂、絮凝剂等化学药剂的用量。这种新型油水分离系统有望在平台排海污

水处理中得到更为广泛的应用。

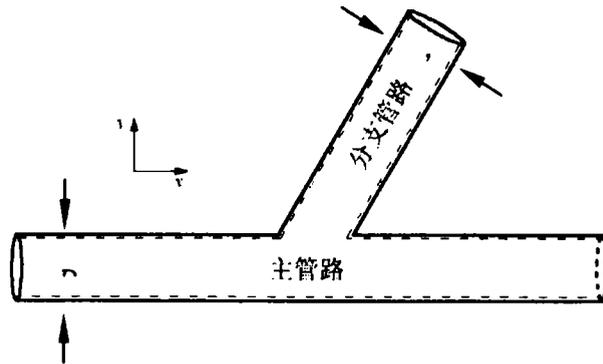


图1 分岔管路示意图

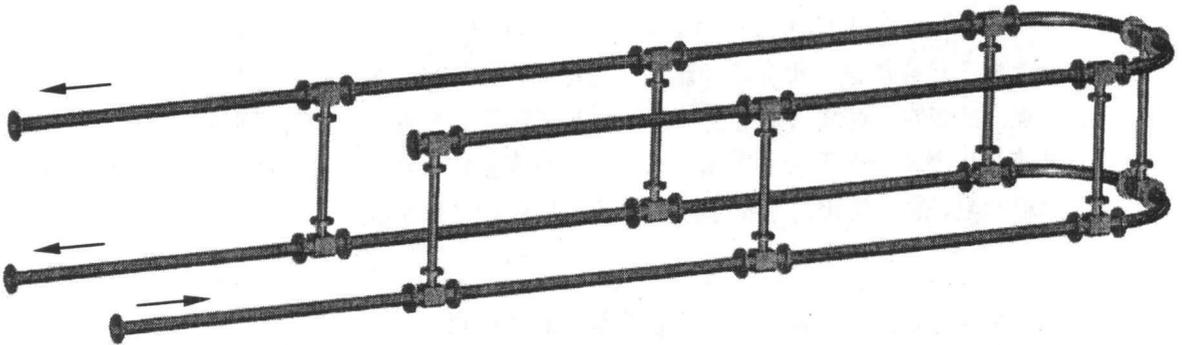


图2 分岔管路油水分离装置

然而，虽然分岔管路作为一种新型油水分离部件已经得到了初步的成功应用，但目前为止分岔管路多相流动的研究仍集中于气液两相流动<sup>[1-3]</sup>，而有关油水等液-液两相流动的研究却非常有限<sup>[4-5]</sup>，这也限制了其作为分离器的分离性能的进一步提升。由于相分布是影响多相管流特性的重要因素，并在很大程度上决定了分岔管路的分离效果和压降损失，因此本研究结合室内实验和数值模拟对不同工况下分岔管路内的油水相分布开展了研究，以指导分岔管路的现场试验和工业应用。

## 2 室内实验

实验是在力学所应用流体力学实验室的多相分离实验平台（图3）上开展的，它可用米对气液两相、液液两相和气液液三相的流动特性和分离现象进行研究。实验平台主要由供给装置、数据采集装置和采样装置等几部分构成，其中供给装置包括储油罐、储水罐、射流混合器、供气系统、水循环系统、油循环系统以及配套的管路、阀门等，而采样装置则主要由电磁阀、采样管路和相应的控制系统等组成。

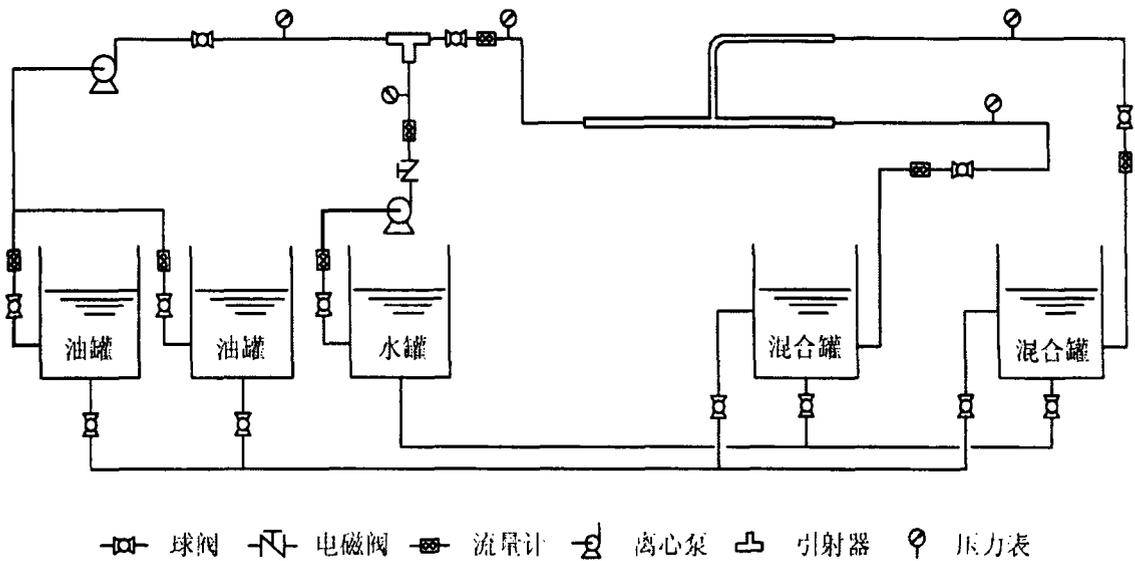


图3 分岔管路实验系统流程图

实验介质为白油和水，其中油品为 PS 白油，其物性参数表 1 所示。

表 1 PS 白油的物性参数

型号	运动黏度/(mm <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup> )		闪点	凝固点	比色	比重 (20℃)	酸值
	37.8℃	98.9℃	(℃)	(℃)	Saybolt	(g/cm <sup>3</sup> )	mgKOH/g
PS	32-84	---	---	≤-12	≥+30	0.8532-0.8830	---

在 20℃、0.1MPa 条件下，水相的物性参数如下：密度  $\rho = 998.2 \text{ kg/m}^3$ 、动力黏度  $\mu = 0.001 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 、表面张力  $\sigma = 0.0712 \text{ N/m}$ 。

### 3 数值模拟

#### 3.1 控制方程组

实验表明，当入口管路内为分层流型时，在整个分岔管路内油水两相存在较为清晰的相界面，此时可以采用 VOF (volume of fluid) 方法进行数值重构。VOF 方法由 Hirt & Nichols 首先提出<sup>[6]</sup>，它通过求解体积分数输运方程来追踪自由面，自由面的位置由体积分数决定。若定义  $\alpha_o(x, y, z, t)$  和  $\alpha_w(x, y, z, t)$  为计算区域内油相和水相的体积分数，在任一计算单元内满足以下关系式：

$$\alpha_o + \alpha_w = 1 \quad (1)$$

在计算区域的一个计算单元内存在三种情况，即：

- (a)  $\alpha_o = 1$ , 计算单元内全部为油相所占;  
 (b)  $\alpha_o = 0$ , 计算单元内全部为水相所占;  
 (c)  $0 < \alpha_o < 1$ , 计算单元内部分为油相、部分为水相, 存在油水界面;

连续性方程: 
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

动量守恒方程: 
$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\mu + \mu_t) \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (3)$$

通常情况下分岔管路内油水两相为湍流流动, 采用  $k-\varepsilon$  二方程模型进行描述。

$k$  方程: 
$$\frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i k)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G - \rho \varepsilon \quad (4)$$

$\varepsilon$  方程: 
$$\frac{\partial (\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i \varepsilon)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (5)$$

式中,  $\rho$ -体积分数平均后的密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $\mu$ -体积分数平均后的分子黏性系数,  $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ;  
 $P$ -修正后的压力,  $\text{N}/\text{m}^2$ ;  $t$ -时间,  $\text{s}$ ;  $u_i$ -速度分量,  $\text{m}/\text{s}$ ;  $x_i$ -坐标分量;  $k$ -湍流动能;  
 $\varepsilon$ -湍流动能耗散率;

此处, 紊流黏性系数  $\mu_t$  的表达式为:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (6)$$

$G$  是平均速度梯度引起的湍流动能产生项, 可表示为:

$$G = \mu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (7)$$

在 VOF 模型中,  $\rho$  和  $\mu$  均为体积分数的函数, 即:

$$\rho = \alpha_o \rho_o + (1 - \alpha_o) \rho_w \quad (8)$$

$$\mu = \alpha_o \mu_o + (1 - \alpha_o) \mu_w \quad (9)$$

模型中各个常数的取值如下:  $C_{1\varepsilon} = 1.44$ ,  $C_{2\varepsilon} = 1.92$ ,  $C_\mu = 0.09$ ,  $\sigma_k = 1.0$ ,  $\sigma_\varepsilon = 1.3$ 。

### 3.2 几何模型和计算方法

根据实验中采用的 T 型分岔管路，建立了三维几何模型（图 4），管径均为 50.0mm，全部采用结构化网格。为更好地捕捉油水界面的分布特征，分岔接头处和分支管路内的网格密度最高，主管路下游次之，入口管路内的网格较少，以降低计算成本。采用控制体积法离散控制方程组，通过欠松弛方法迭代求解，其中压力-速度耦合采用 PISO 算法，相界面采用 Youngs 等<sup>[7]</sup>提出的 PLIC 重构算法。

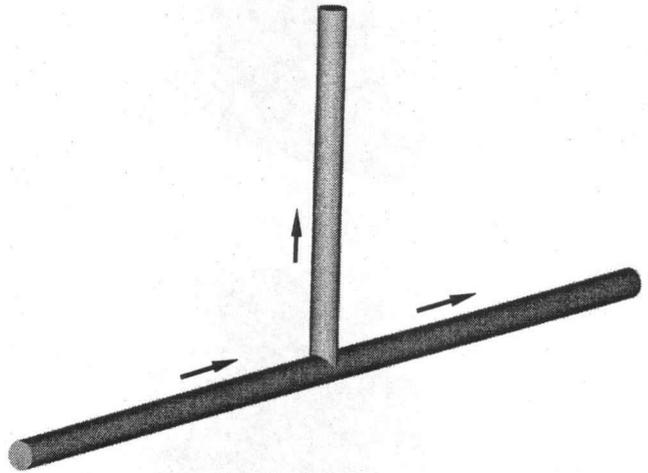


图 4 分岔管路几何模型

## 4 结果与分析

### 4.1 入口含油率

在 T 型分岔管路中，分岔接头内的油水相分布在两相分离中起着非常关键的作用。为此，采用前面建立的控制方程、定解条件和几何模型，在图 5 中对分层流型下分岔接头内的油水相分布情况进行了数值模拟，其中红色部分为油相，蓝色部分为水相。当入口混合流速  $v_m = 0.60\text{m/s}$ 、入口含油率  $\alpha_o$  为 0.05、0.10、0.20 和 0.30 时，可以看出分岔接头内的油水相分布呈现出非常复杂的三维结构。在分支管路入口段靠近入口管路一侧，存在一个明显的回流区，部分油相会被卷入这一区域（图 5.b）。在同样的流量配比  $F_b = 0.15$  下，当入口含油率为 0.05 和 0.10 时，油相分散在水相中，且所有的油相均进入了分支管路，而当入口含油率增至 0.20 和 0.30 后，情况变得更为复杂，一部分油相将和水相一起流入了下游主管路内。因此，同样入口条件和运行工况下随着入口含油率的增加，油水分离效率将会逐渐降低。

图 6 给出了分支管路内的油水相分布情况，由于油相具有一定的动量，因此通常是在分支管路底部的下游位置处流入分支管路内。当入口含油率为 0.05 时，分支管路内油相主要以液滴和液丝等形式分散于水相中。随着含油率的逐渐上升，油水界面在流动过程中不断变化，除少部分油相仍呈分散状以外，绝大部分油相将由贴近壁面的位置逐渐向管路中心靠拢。

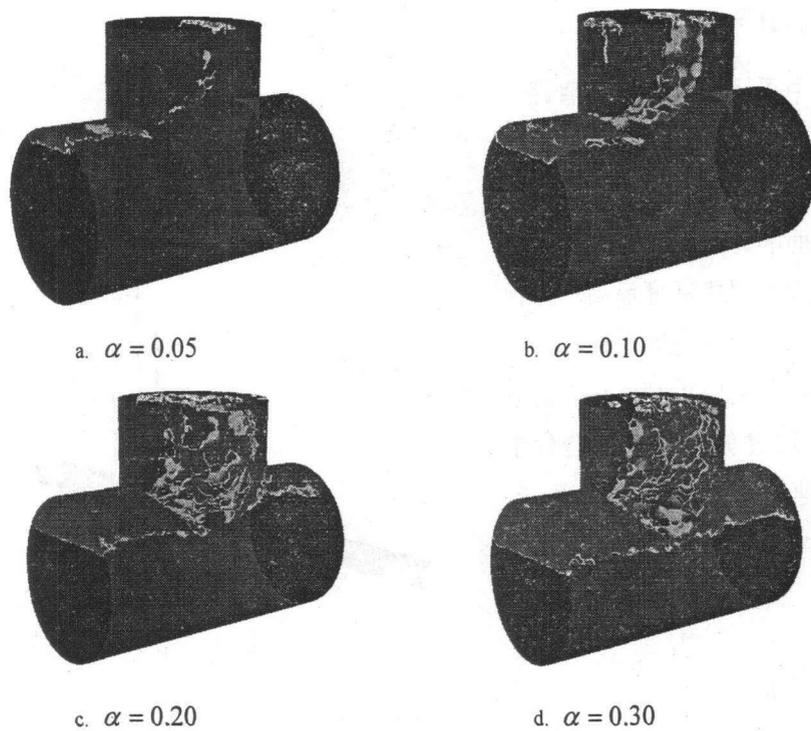


图5 不同入口含油率下分岔接头内的油水相分布情况

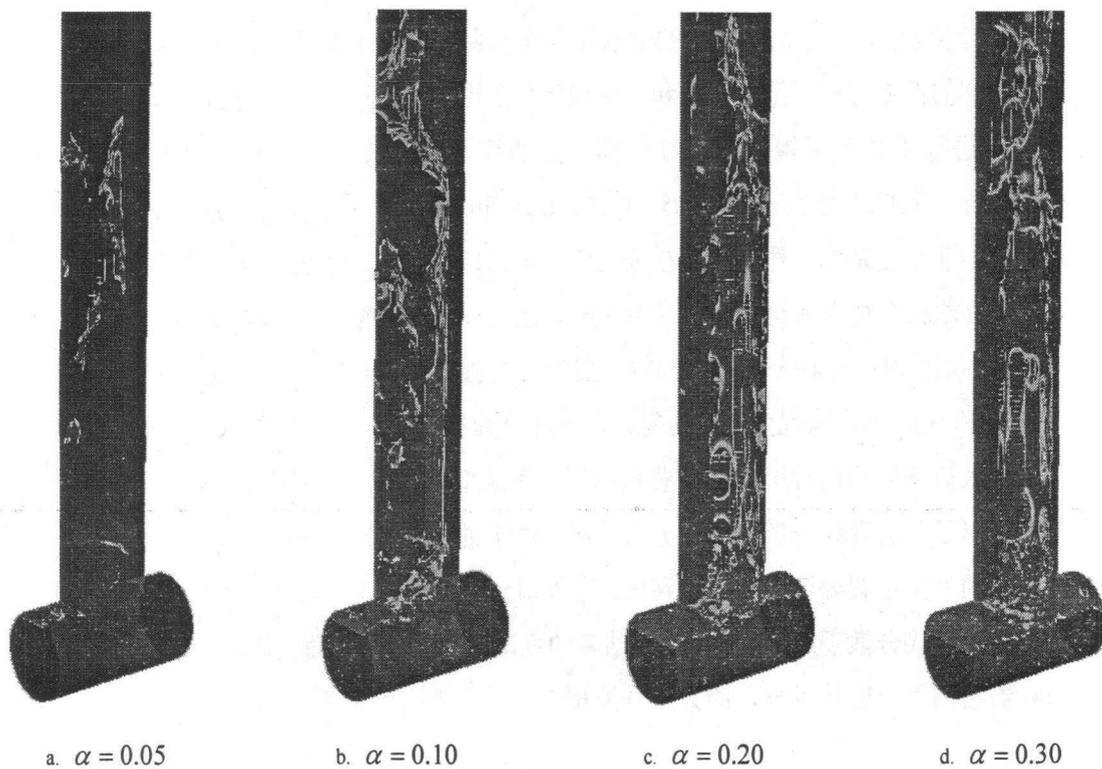


图6 不同入口含油率下分支管路内的油水相分布情况

## 4.2 入口流速

当入口管路内油相流速  $v_o = 0.15\text{m/s}$  时, 图 7 中 a、b、c、d 分别给出了水相入口流速  $v_w$  为  $0.3\text{m/s}$ 、 $0.5\text{m/s}$ 、 $0.7\text{m/s}$ 、 $0.9\text{m/s}$  情况下分支管路内的油水分布情况。可以看出, 当水相流速较低时, 油相通常呈块状上升, 随着水相流速的增加, 导致油块破碎的因素如剪切应力、湍流脉动等的作用明显增强, 油相逐渐被拉长成液丝状, 更倾向于以液滴形式分散于水相之中, 流型也相应地逐渐由块状流型过渡为分散流型。

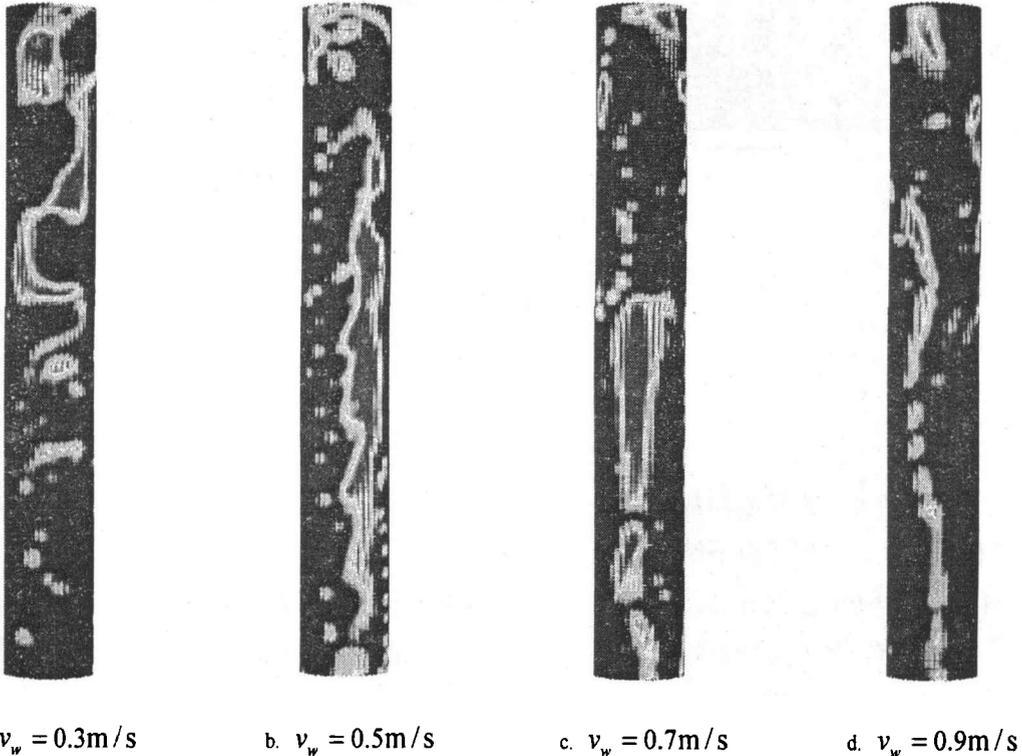


图 7 不同流速下分支管路内的油水分布情况

## 4.3 与实验的比较

图 8 为部分实验工况下分支管路入口段和主体段内的油水相分布情况。可以看出, 当油水两相在分岔接头内发生流量和相分配不均现象后, 在分支管路内的管路截面上油相倾向于聚集在右侧位置, 在垂直向上流动的过程中又有逐渐均匀分散于水相中的趋势。受分岔接头处的扰动、剪切应力、重力、界面张力和湍流脉动等因素的影响, 分支管路内的油水相分布比较复杂, 较大的油块可能会出现拉伸、变形、破碎、聚合等多种现象。此外, 当含油率较低时, 逐渐增加混合流速后油相将以小液滴的形式存在于水相之中, 而减小混合流速或者增加入口含油率后油相更倾向于以形状、大小不一的油块形式出现。这些与前面的数值模拟结果是相符的, 表明采用 PLIC 方法能够比较准确地反映相分布的主要特征, 为通过数值手段进行分离效率和压降损失的计算乃至分岔管路的结构优化奠定了基础。

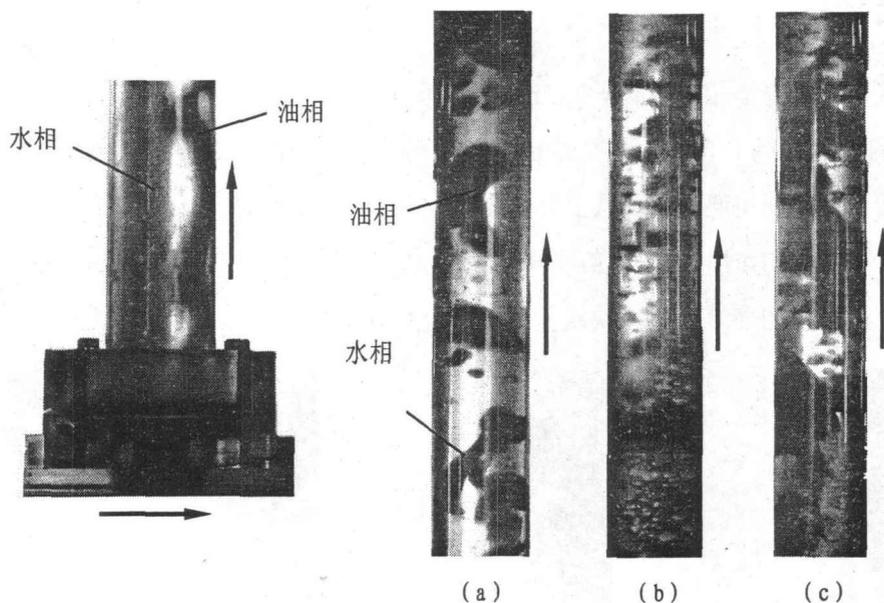


图 8 分支管路入口段和主体段内的油水相分布

## 5 结论

本研究结合室内实验和数值模拟,对分岔管路这种新型管式分离器内的油水两相流动特性进行了研究,得到了以下结论。

(1) 与传统的油水分离设备相比,分岔管路具有分离效率高、体积紧凑、压降损失小等优点,并可减少破乳剂、絮凝剂等化学药剂的用量,有望在海洋石油开采中得到更为广泛的应用。

(2) 采用VOF模型中的PLIC方法,对分层流型下分岔接头和垂直管路内的油水相分布进行了界面重构,计算再现了油相的拉伸、变形、破碎、聚合等现象,与实验观测结果符合较好,为通过数值手段计算分离效率和压降损失乃至优化分岔管路的结构等奠定了基础。

## 参 考 文 献

- [1] Hong KC, Griston S. Two-phase flow splitting at an impacting tee. SPE Production and Facilities. 1995, 10: 184-190.
- [2] Stacey T, Azzopardi B J, Conte G. The split of annular two phase flow at a small diameter T-junction. Int J Multiphase Flow, 2000, 26: 845-856.
- [3] Azzopardi B J, Wren E. What is entrainment in vertical two-phase churn flow. Int J Multiphase Flow, 2004, 30: 89-103.
- [4] Yang L, Azzopardi B J, Belghazi A. Phase separation of liquid-liquid two-phase flow at a T-junction. AIChE Journal, 2006, 52 (1):141-149.

- [5] Yang L, Azzopardi B J. Phase split of liquid-liquid two-phase flow at a horizontal T-junction. *Int J Multiphase Flow*, 2007, 33 (2): 207-216.
- [6] Hirt C W, Nichols D. Volume of fluid method for the dynamics of free boundary [J]. *Journal of Computational Physics*, 1981, 93: 201-225.
- [7] Youngs D L. Time-dependent multi-material flow with large fluid distortion [M]. *Numerical Methods for Fluid Dynamics*. New York: Academic, 1982. 273-285.