

分岔管路内油水两相流动的研究*

王立洋 郭军 张军 唐驰 郑之初

(中国科学院力学研究所, 北京 100080)

摘要: 分岔管路大量存在于石油行业的输送管网中, 油水两相流在分岔管路内的流动特性将对流程控制、动力匹配及下游处理设施产生显著的影响。对分岔管路内的油水两相流动进行了实验研究, 采用不可压缩 Navier-Stokes 方程结合双流体模型和混合 $k-\varepsilon$ 模型对分岔管路内的油水两相流动进行了数值模拟, 获得了初步的结果。计算表明, 数值模拟能够较好地反映分岔管路内的油水两相流动, 为工程设计提供参考。

关键词: 分岔管路; 两相流动; 油水分离; 数值模拟

1 引言

油田的输送管网中存在着大量的分岔管路(图1), 当油水混合物经过这些分岔管路时, 通常下游各支管中的流量会产生不均匀分配, 油水比例也要发生变化, 即在分岔处流量和油水两相会发生重新分配现象, 这对下游的流程控制、动力匹配和处理设施造成了显著的影响。此外, 随着石油开采逐渐由陆地转向海洋, 研制适合海上平台使用的高效、紧凑型分离器成为海洋工程研究的热点^[1,2]。近年来, 有学者^[3,4]提出利用垂直分岔管路内的各相重新分配现象达到多相分离的目的, 这对于减小分离器体积、降低平台建造成本等方面具有重要的意义。

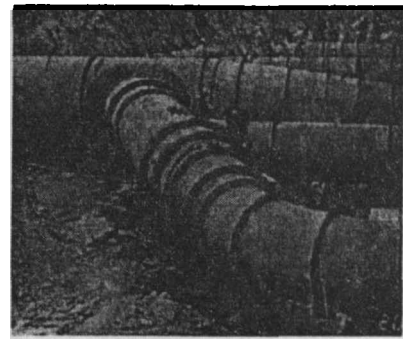


图1 分岔管路

近30年来, 学者们对分岔管路内的多相流动进行了大量的研究。1973年, Oranje^[5]指出在天然气管网中气体/凝析液经过分岔管路时会出现不均匀分配的现象, 并进行了相关的室内实验, 作者认为决定气、液相进入支管的因素有压降、液相惯量、入口流型和分岔管路的几何形状等。自此以后, 学者们对分岔管路内的两相流动特性进行了细致的研究。Shoham 等人^[6]在管径为 50 mm 的分岔管路内进行了空气-水两相流动实验, 研究了入口流型对相分配的影响, 并提出了入口为分层流和环状流时的预测模型。当入口含液率低于 0.06 时, Hart 等人^[7]

* Email: wangliyong@imech.ac.cn

提出了“双流线模型”，对水平布置分岔管路内的气-液相分配进行计算，预测结果与实验数据符合良好。Adechy 等人^[8]利用数值模拟技术，对垂直布置分岔管路内的空气-水环状流动进行了研究，采用薄边界层理论来处理液膜区，管路中心认为是均匀的气/液混合物，在一定范围内计算得到的相分配结果与实验值比较吻合。2006 年，Yang 等人^[9]在垂直布置的分岔管路内对油水两相流进行了实验，当入口为分层流型时分岔管路可以对油水两相进行较好的分离，而在弥散流时分离效果会急剧下降，即分离效果对入口流型非常敏感，这是有关分岔管路内油水两相流动的首次报道。同年，Yang 等人^[10]还对水平布置的分岔管路进行了实验研究，发现此时分岔管路对油水两相几乎没有分离效果。

虽然 20 世纪 20 年代即有学者开始关注分岔管路内的单相流动，然而直至目前多相流领域仍主要集中于单管中流型转换、各相含率、压降损失和动力响应等参数的研究，而对石油、化工、核能行业中大量出现的分岔管路等复杂结构物中的多相流研究却非常有限。因此，结合数值模拟和模型实验两种方法，对分岔管路内的油水两相流动进行研究。

2 数值模拟

近年来，数值模拟技术已经越来越广泛地应用于多相流研究领域。Ghorai 等人^[11]对水平管路内的气液波状分层流型进行了数值模拟，计算得到的剪切应力分布和速度剖面图与实验结果符合良好。Taha 等人^[12]采用 VOF 模型，对垂直管路内的 Taylor 气泡进行了计算，发现段塞的形状、速度、速度场分布等均与实验比较吻合。周永等人^[13]对直管和螺旋管内的油水两相流动进行了计算，较好地模拟了油水两相在重力和离心力作用下的分离现象。多相流模型主要包括混合模型和双流体模型，其中双流体模型对各相单独求解连续性方程和动量方程，通过压力和相间交换系数进行耦合，从而可以获得各相的流动信息。因此，本研究拟采用双流体模型，对分岔管路内的油水两相流动进行计算和分析。

2.1 连续性方程

根据质量守恒定律，得到

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_k \rho_k) + \nabla \cdot (\alpha_k \rho_k \vec{u}_k) = 0 \quad (1)$$

$$\sum_{k=1}^2 \alpha_k = 1 \quad (2)$$

其中： α 为相含率； ρ 为密度 (kg/m^3)； u 为速度 (m/s)； k 为油相和水相；

2.2 动量方程

对 k 相，根据动量守恒定律：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_k \rho_k \vec{u}_k) + \nabla \cdot (\alpha_k \rho_k \vec{u}_k \vec{u}_k) = -\nabla(\alpha_k p) - \nabla \cdot \vec{\tau}_k + \alpha_k \rho_k \vec{g} + \alpha_k \rho_k (\vec{F}_k + \vec{F}_{\text{lift},k} + \vec{F}_{\text{vm},k}) + K_{kl}(\vec{u}_k - \vec{u}_l) \quad (3)$$

计算中假定离散相是以液滴形式存在于连续相之中，当液滴的直径较大时必须考虑作用于其上的升力 F_{lift} ，可按下面公式进行计算^[14]：

$$F_{\text{lift}} = -0.5 \alpha_k \rho_k \left| \vec{u}_k - \vec{u}_l \right| \times (\nabla \times \vec{u}_l) \quad (4)$$

动量守恒方程中的附加质量力 F_{vm} 定义式为：

$$F_{\text{vm}} = \frac{1}{2} \alpha_k \rho_k \left(\frac{d\vec{u}_l}{dt} - \frac{d\vec{u}_k}{dt} \right)_l \quad (5)$$

对于油水两相流动，相间交换系数 K_{kl} 的表达式为：

$$K_{kl} = \frac{\alpha_k (\alpha_k \rho_k + \alpha_l \rho_l) f}{\tau_{kl}} \quad (6)$$

其中，液滴迟豫时间 τ_{kl} 和曳力函数 f 的定义式分别为：

$$\tau_{kl} = \frac{(\alpha_k \rho_k + \alpha_l \rho_l) \left(\frac{d_k + d_l}{2} \right)^2}{18(\alpha_k \mu_k + \alpha_l \mu_l)} \quad (7)$$

$$f = \frac{C_D Re}{24} \quad (8)$$

式中：

$$C_D = \begin{cases} \frac{24(1 + 0.15 Re^{0.687})}{Re} & , Re \leq 1000 \\ 0.44 & , Re > 1000 \end{cases} \quad (9)$$

$$Re = \frac{\rho_k \left| \vec{u}_k - \vec{u}_l \right| d_k}{\mu_k} \quad (10)$$

其中： p 为压力 (N/m^2)； t 为时间 (s)。

2.3 湍流模型

多相流中的湍流模型比单相流动要复杂得多，其中应用最广的是 $k-\varepsilon$ 模型，包括混合湍

流模型、分散湍流模型和各相湍流模型。对于分层流及两相密度比接近于 1 的情况，利用混合湍流模型可以对湍流特性进行很好的捕捉^[15]。

混合湍流模型中， k 和 ε 的方程分别为：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m k) + \nabla \cdot (\rho_m \vec{u}_m k) = \nabla \cdot \left(\frac{\mu_{t,m}}{\sigma_k} \nabla k \right) + G_{k,m} - \rho_m \varepsilon \quad (11)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m \varepsilon) + \nabla \cdot (\rho_m \vec{u}_m \varepsilon) = \nabla \cdot \left(\frac{\mu_{t,m}}{\sigma_\varepsilon} \nabla \varepsilon \right) + \frac{\varepsilon}{k} (C_{1\varepsilon} G_{k,m} - C_{2\varepsilon} \rho_m \varepsilon) \quad (12)$$

式中：混合密度 ρ_m 和混合速度 \vec{u}_m 的定义式可写为：

$$\rho_m = \sum_{k=1}^2 \alpha_k \rho_k \quad (13)$$

$$\vec{u}_m = \frac{\sum_{k=1}^2 \alpha_k \rho_k \vec{u}_k}{\sum_{k=1}^2 \alpha_k \rho_k} \quad (14)$$

湍流黏度 μ_t 和湍流动能 $G_{k,m}$ 可表示为：

$$\mu_{t,m} = \rho_m C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (15)$$

$$G_{k,m} = \mu_{t,m} \left[\nabla \vec{u}_m + \left(\nabla \vec{u}_m \right)^T \right] : \nabla \vec{u}_m \quad (16)$$

2.4 计算区域及网格生成

在 Gambit 前处理软件中生成了计算区域的几何体（图 2），分支管路和主管路的直径相等。在划分网格时，为了捕捉近壁处的流动特征，从管路中心到壁面逐渐对网格进行加密。

2.5 边界条件

主管路入口给定各相的速度及含率；主管路出口和分支管路出口均设定压力值；管路壁面上采用无滑移条件，即速度和湍流度均为零。

2.6 模型验证

为了对计算模型进行验证，首先根据 Yang 等人^[10]的实验数据，对水平布置分岔管路内的油水两相流动进行了模拟，并与实验结果进行了比较。

图 3 是入口混合流速 0.55 m/s，含油率 27.3% 时入口流型、截面流线分布的计算结果以及

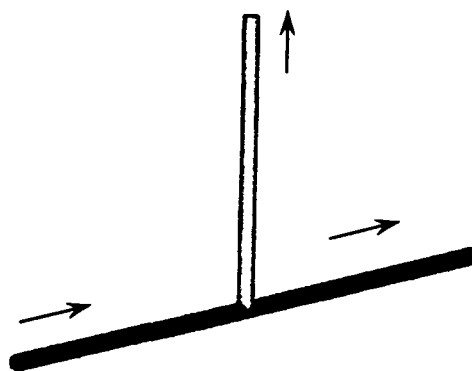


图 2 分岔管路计算模型

对应的实际入口流型。

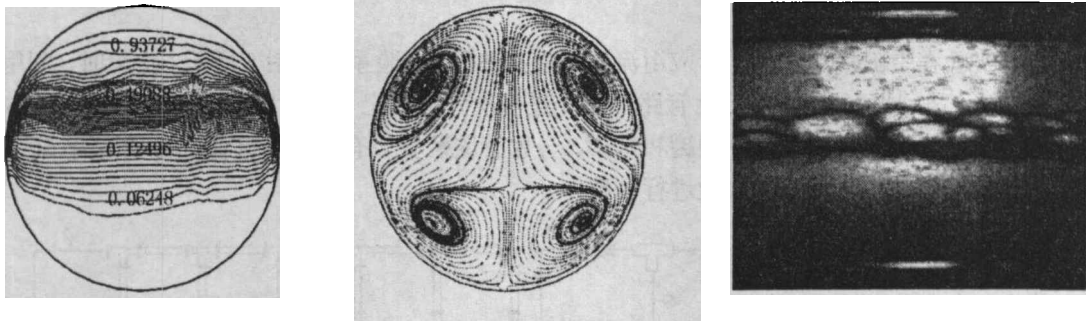


图3 管截面相分布、流线分布及与实验^[9]的比较

可以看出，截面顶部为油相聚集区，底部为水相聚集区，中间为油水混合物，属于带有混合层的分层流型（ST&MI），与 Yang 等人^[9]在实验中观察到的流型一致。入口管路位于分岔点之前，管路截面上油水混合物的流线分布主要是受到重力的影响。由于在重力作用下密度较小的油滴将会上浮，同时水相逐渐下沉，因此在入口管路截面上将会出现对称分布的漩涡。

对两个实验工况的油、水两相分配比进行了数值模拟，即 1#：入口流速 0.55m/s，含油率 27.3%；2#：入口流速 0.86m/s，含油率 25.6%。由图 4 可以看出，各相分配比的数值模拟结果与实验数据趋势一致、符合良好，在两个工况下油水的相重新分配现象并不明显，与 Yang 等人^[10]的实验结论相符，表明数值模拟能够对分岔管路内的油水两相流动进行准确的预测。

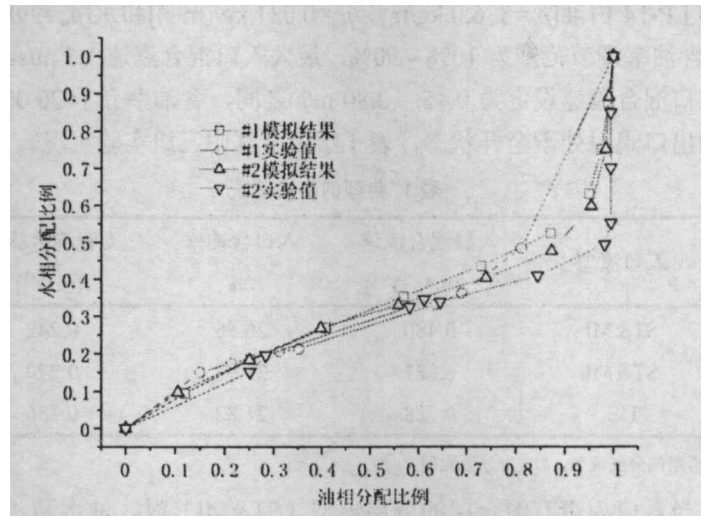


图4 油、水两相分配比数值结果与实验数据的比较

3 室内实验和模拟结果比较

实验在中国科学院力学所应用流体实验室进行, 实验系统如图 5 所示。实验时, 利用泵将油输出, 与水混合后进入分岔管路, 在经过多次分岔后上、下管路的油水两相分别流入混合罐, 待沉降分离后再循环回油罐和水罐。分岔管路装置设有六根垂直管, 管径均为 50 mm, 实验中根据需要可对分岔次数进行调整。

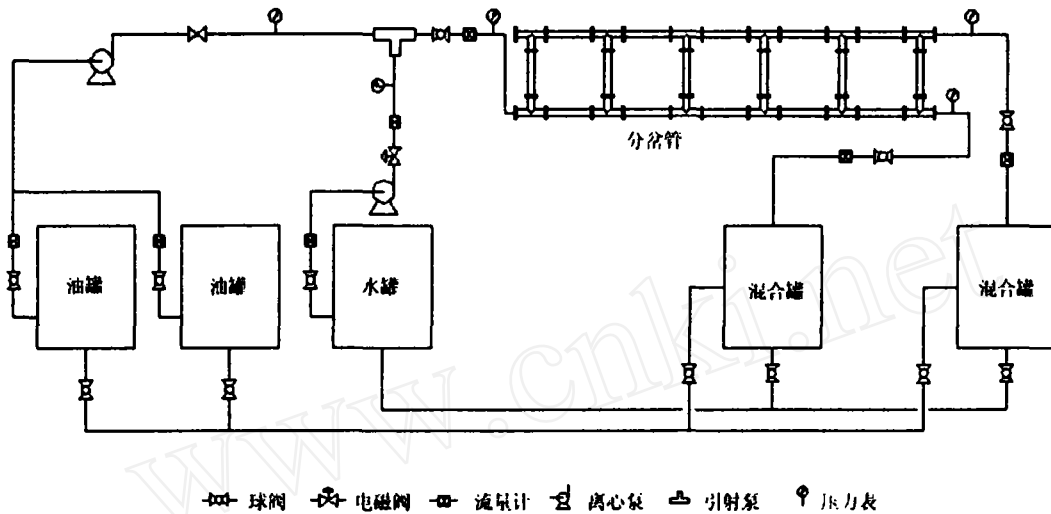


图 5 分岔管路油水两相流实验系统

实验介质为 LP-14 白油 [$\rho_o=836.0 \text{ kg/m}^3$, $\mu_o=0.031 \text{ kg/(m}\cdot\text{s)}$] 和水 [$\rho_w=998.0 \text{ kg/m}^3$, $\mu_w=0.001 \text{ kg/(m}\cdot\text{s)}$], 入口含油率调节范围为 10%~90%, 最大入口混合流速 1.5 m/s。

实验中, 入口混合流速设定为 0.45~0.80 m/s 之间, 含油率介于 20.0%~45.0%, 分岔管路上、下管路的出口阀门处于全开状态, 表 1 给出了其中三组实验工况。

表 1 典型的实验工况

实验序号	入口流型	入口混合流速 $/(m\cdot s^{-1})$	入口含油率 /%	支管混合流速 $/(m\cdot s^{-1})$	支管含油率 /%
1	ST&MI	0.480	26.56	0.242	39.16
2	ST&MI	0.521	29.97	0.279	40.07
3	DS	0.728	21.82	0.356	23.41

注: ST&MI 为带有混合层的分层流型, DS 为分散流型。

可以看出, 当入口为带有混合层的分层流型 (ST&MI) 时, 油水两相在分岔处发生了明显的相重新分配现象, 而在分散流型 (DS) 下分岔管路几乎没有起到油水分离的作用, 表明分离效率对入口流型非常敏感。单分岔管路的这种分离特性显然不符合实际工程应用的要求, 通过安装多根垂直管, 对油水两相进行多次分岔以降低分离效率对入口工况的敏感程度, 应该是分岔管路装置实现工程应用的可行方案。

数值模拟时, 根据实验工况确定边界条件, 分岔管路上、下出口的压力均设定为 1 atm。

此处以第一组工况为例，对数值计算和实验的结果进行比较，其中入口流型的数值结果与图 3 类似，并与实验中观测到的流型一致（图 6）。



图 6 入口管路内的油水流型 (ST&MI)

图 7 为主管路下游不同截面上的油相分布情况，截面位置距分岔点分别为 2 倍、6 倍与 10 倍管径。由图 7 (a) 可以看出，主管路下游的截面相分布发生了变化，表现为油层和水层变薄，而混合层厚度大幅增加，这主要是由分岔处的扰动导致的。随着油水两相继续向下游流动，在重力作用下混合层厚度逐渐减小，截面相分布在分岔处下游约 8 倍管径处趋于稳定。

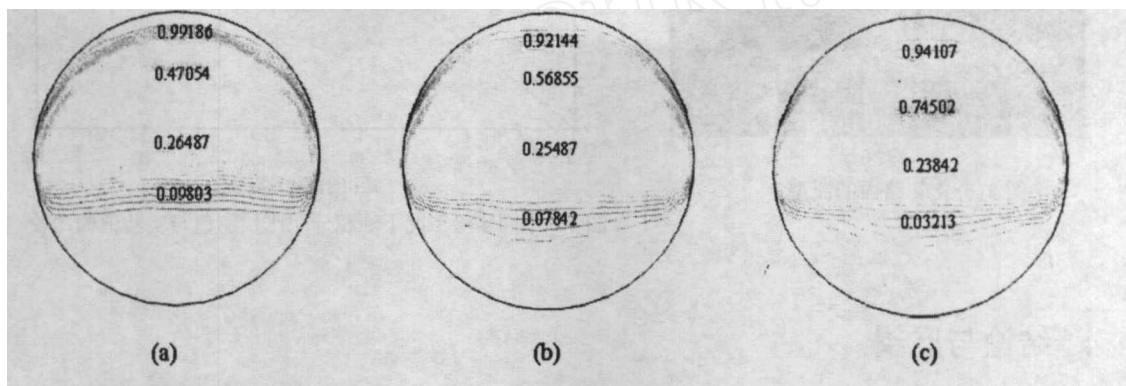


图 7 主管路下游截面上油相分布

图 8 为分支管路的截面相分布图，截面位置和分岔点间的距离与前面相同。可以看出，分支管路和主管路内的截面相分布差异明显。当处于分层流型的油水两相进入分支管路时，

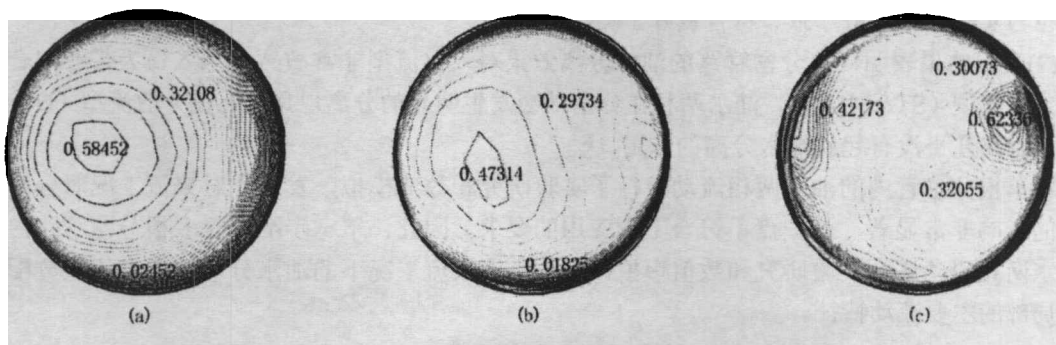


图 8 分支管路截面上油相分布

油相由于动量较小而聚集于管截面上靠近入口一侧。随着混合物继续往上流动，分岔处的影响逐渐减弱，并且此时重力对两相的作用是对称的，因此截面上的相分布渐趋均匀。此外，油相的密度较小，在浮力的作用下流速将逐渐增大，因而更趋于分布在截面中心位置。在近壁处含油率接近于 0，表明此处几乎全部为水相，与实验观测（图 9）相一致，图中灰色部分为加入高锰酸钾后的水相，白色部分为油相。

在不同实验工况下，油相分配比预测值与实验值的比较如图 10 所示。可以看出，预测值与实验值之间非常吻合，表明数值模拟能够对油水两相在垂直分岔管路内的分岔现象进行准确的预测。

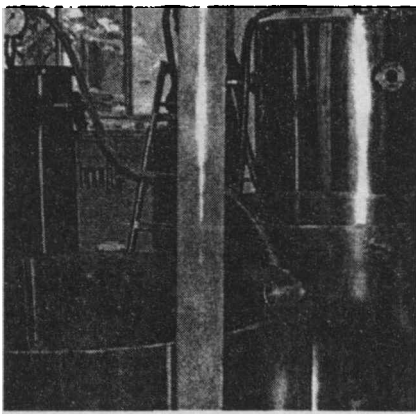


图 9 分支管路内的流型

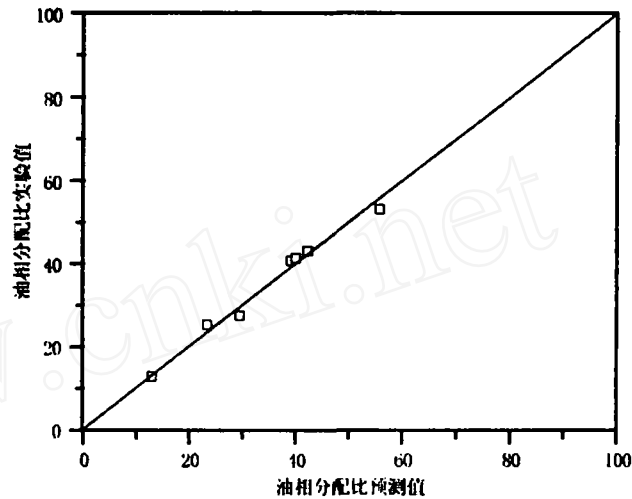


图 10 不同实验工况下油相分配比预测值与实验值的比较

4 结论与展望

对分岔管路内的单相流动和油水两相流动进行了数值模拟和实验研究，主要结论为：

(1)采用双流体模型和混合 $k-\varepsilon$ 湍流模型，能够对分岔管路内的油水两相流动进行数值模拟，计算得到的流型、截面相分布与实验观测相符，各相在支管路与主管路内分配比例的预测值也与实验数据趋势一致、符合良好。

(2)实验结果表明，单分岔管路的油水分离效果对入口流型非常敏感，当入口为带有混合层的分层流型 (ST&MI) 时，油水两相在分岔处会发生明显的分离现象，而在分散流型 (DS) 下分岔管路几乎没有起到油水分离的作用。

对单根分岔管内的油水两相流动进行了实验研究和数值模拟，发现此时来流工况对分离特性的影响非常显著，这一点不符合工程应用的要求。因此，下一步准备对多根分岔管路内的油水两相流动进行实验研究和数值模拟，得到不同来流工况下的油水分离效率、流量分配以及局部的主要流动特征。

参 考 文 献

- 1 郑之初, 吴应湘, 李清平等. 复合式油气水分离器研究. 中国造船, 2005, 46: 543-549.
- 2 郑之初, 周永, 郭军, 等. 海上油气混输中的分离技术. 实验流体力学, 2005, 19 (1): 94-98.
- 3 Azzopardi B J. T junctions as phase separators for gas liquid flows: possibilities and problems. Chemical Engineering Research & Design, 1993, 71: 273-281.
- 4 Azzopardi B J, Colman D A, et al. Plant application of a T junction as a partial phase separator. Chemical Engineering Research & Design, 2002, 80: 87-96.
- 5 Oranje L. Condensate behavior in gas pipelines is predictable. Oil and Gas Journal, 1973, 39-44.
- 6 Shoham O, Brill J P, et al. Two phase flow splitting in a tee junction - experiment and modeling. Chemical Engineering Science. 1987, 42: 2667-2676.
- 7 Hart J, Hammersma P J, et al. A model for predicting liquid route preference during gas - liquid flow through horizontal branched pipelines. Chemical Engineering Science. 1991, 46, 1609-1622.
- 8 Adechy D, Issa R I. Modeling of annular flow through pipes and T - junctions. Computers & Fluids, 2004, 33: 289-313.
- 9 Yang L, Azzopardi B J, et al. Phase separation of liquid - liquid two - phase flow at a T - junction. AIChE Journal, 2006, 52: 141-149.
- 10 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.
- 11 Ghorai Subhashini, Nigam K. D. P., CFD modeling of flow profiles and interfacial phenomena in two-phase flow in pipes. Chemical Engineering and Processing, 2006, 45: 55-65.
- 12 Taha Taha, Cui Z F. CFD modeling of slug flow in vertical tubes. Chemical Engineering Science, 2006, 61: 676-687.
- 13 周永, 吴应湘, 郑之初等. 油水分离技术研究之一 —— 直管和螺旋管的数值模拟. 水动力学研究与进展, A辑, 2004, 19 (4): 540-546.
- 14 Drew D A, Lahey R T. Particulate Two-Phase Flow. Boston: Butterworth-Heinemann, 1993, 509-566.
- 15 陈国谦, 李行伟. 热泡数值研究. 水动力学研究与进展, Ser. A, 2000, 15 (4): 411-423.

An investigation on oil-water two-phase flow inside T-junction

WANG Li-yang, GUO Jun, ZHANG Jun, TANG Chi, ZHENG Zhi-chu

(Institute of Mechanics, CAS, Beijing, 100080)

Abstract In the present study, the oil/water two-phase flow inside T-junctions was numerically simulated with 3-D two-fluid model equations, and the turbulence is described using the mixture $k-\varepsilon$ model. Some primary experiments were also conducted in the laboratory, and the results show that the separating performance of T-junction is very sensitive to the inlet conditions. A reasonable agreement was obtained between the numerical results and the experiments for both the

oil fraction distribution and the separation efficiency.

Key words T-junction, two-phase flow, liquid/liquid separation, numerical simulation

www.cnki.net