

复合式分离器的研究总结与展望

郑之初 张军 郭军 唐驰 王立洋

(中国科学院力学研究所, 北京, 10080)

摘要:总结了自2001年开始,六年来中国科学院力学研究所在复合式分离器研究方面取得的进展。在工程研究方面,从提出集重力、离心力、膨胀于一体的复合式分离方法开始,采用以实验为主结合数值模拟的研究路线,得到了螺旋管、T型管等主要分离部件的设计准则,然后按工业使用的1/10缩尺比例(体积)设计制造了高效复合式油水分离器实验样机,通过试验,达到了分离后油中含水率小于1%的当代国际先进水平。按相同的油水处理量与国内、国际上的分离器相比,重量可减轻30%左右。目前新制造的直径2.4m长6m的工业样机已在河北霸州的华北油田上进行实际的工业应用试验。

在学术研究方面:以液滴沉降的力学模型为基础,用Fluent方法计算了螺旋管中油水两相流动,得到了有小孔质量流出的螺旋管流场,在流出的流量及其组分配比上都与实验结果吻合较好;对国际前沿研究的孔管流动开展了流态分析和数值模拟计算,得到了新的进展。

关键词:多相流,复合分离器,油水分离实验,螺旋管,T型管,数值模拟

1 引言

随着海上油气田开发向深海发展,为了最大限度地节省平台或油轮空间,配合水下生产系统,利用卫星进行远距离油田开发,油、气、水的多相分离技术研究得到了世界各国的重视^[1],"十五"期间,中国海洋石油总公司与中国科学院重大科技合作项目中,列入了上述研究课题。并提出了在考虑油气水分离条件下,以油水分离为主,侧重于稠油,油水分离后要达到油中含水小于1%的当代国际先进水平的技术指标。

从历史发展情况来看,分离器的研究基本上是从陆上油田开始的,通常应用的分离原理有重力、膨胀、离心、电、复合等几种方式。在国内外文献、专利调研以及国内陆上油田具有高效分离器使用状况的考察基础上^[2],2002年底,我们提出了结合离心、重力、膨胀、振动几种分离原理于一体的复合式高效分离方案(图1)并制定了项目实施技术路线(图2)。它以实验研究为主,在实验中分项考核离心、重力、膨胀等分离原理对油气水分离的有效程度,结合对直管、螺旋管、容器中分离的数值模拟,设计复合式分离器的样机。

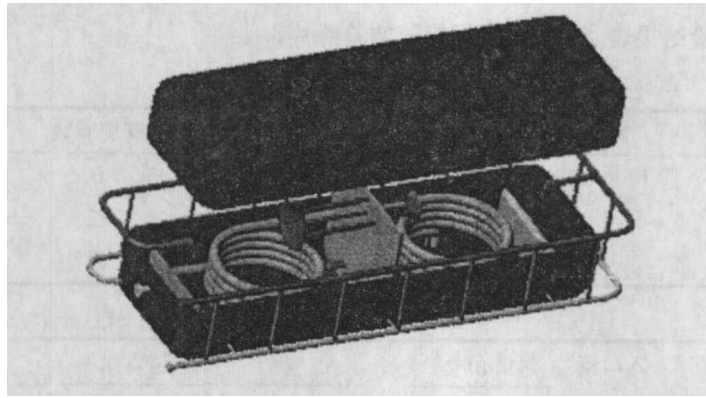


图1 复合式分离器设计构想

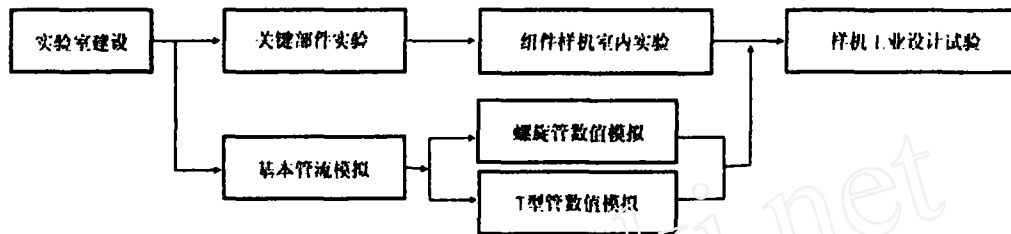


图2 项目技术路线

2 工程研究进展

2.1 实验室建设

2003 年底, 力学所建成了可以进行油气水复合式分离器关键部件实验的实验装置, 它由储油罐、储水罐、射流混合器、供气系统、水循环系统以及计量系统等部分组成。主管直径 50mm, 管内油水混合物最大流速为 2m/s, 单相时管内最大气体流速为 50 m/s, 自行研制的射流混合器可使油水均匀混合, 在油气水三相混合时, 水平管及垂直管中能实现如泡状、弹状、栓状、环状等各种流态。图 3 为建成后的部件实验装置。

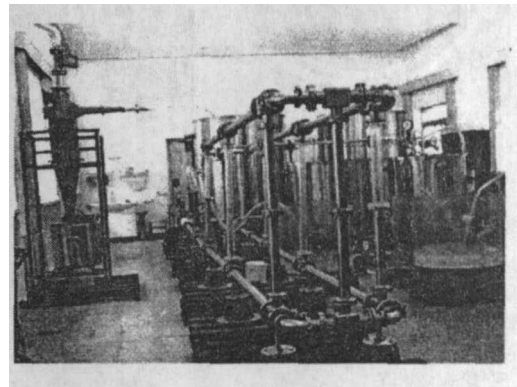


图3 部件实验装置

2.2 关键部件的实验结果

2.2.1 螺旋管实验

离心分离的关键部件是螺旋管, 油水分离效果主要由 ρ_w/ρ_o 和 u^2/Rg 两个无量纲量支配, 对于稠油 $\rho_w/\rho_o \approx 1$, 所以分离效果主要取决于 u^2/Rg 的大小, 前期实验采用三种规格的螺旋

管见表 1，部分实验结果表 2，图 4 为螺旋管实验照片。

表 1 螺旋管规格表

螺旋管	回旋半径 R	管直径 D	螺距 T	螺旋圈数	总高度 H
1	400	40	100	6	600
2	150	25	100	12	600
3	150	25	80	12	480

表 2 部分实验结果

序 号	螺旋管	入口流 速 $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	流量 $(\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1})$		含水率				
			入口	出口	入口	1排	2排	3排	出口
1	D40	1.16	5.24	0.01	0.466	0.523	0.508	0.382	0.098
2	D25	0.78	1.37	0.00	0.398	0.547	0.436	0.217	-

实验后发现带孔螺旋管是有效的新型油水分离部件，回转半径越小，分离效果越好；过分提高螺旋管液体速度使流经螺旋管的压降大大增加，为了弥补降低流速使离心力减少之不足，减少螺旋管螺距，增加回转圈数；为保证分离效率，开孔圈数不大于三圈，小孔孔径和数量采用多圈递减形式，结合数值模拟，考虑 u^2/kg 其值在 1~10 之间，螺旋管开孔位置应在外侧正中再沿顺时针方向下移一个角度为好。

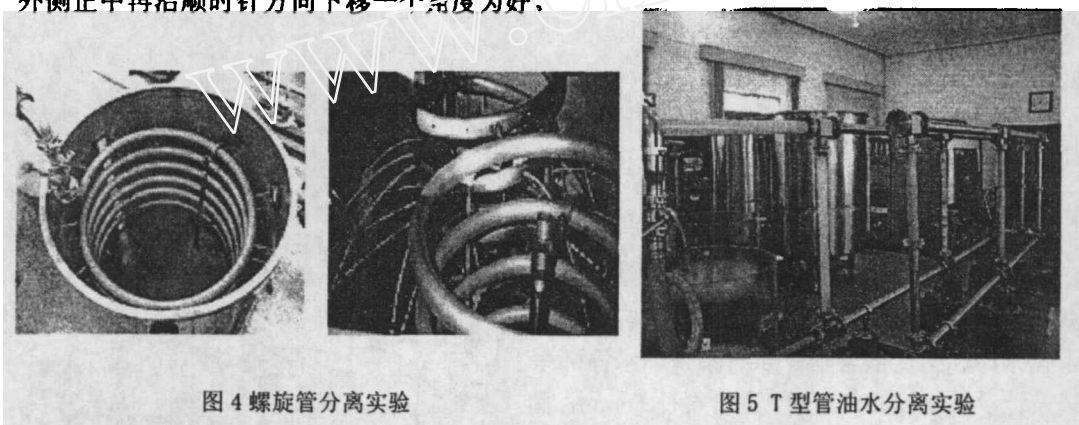


图 4 螺旋管分离实验

图 5 T 型管油水分离实验

2.2.2 T 型管实验

T 型管由二根水平管与 n 根垂直管组成（图 5），在复合式分离器中，起气液与液液的预分作用，它利用重力和膨胀双重的分离原理，分离效果的好坏主要在于垂直管管径、高度与数量的选择。

早期实验我们选择了高度和直径之比 $h/d=10$ ，管径选择垂直支管中流量小于主管流量的 $1/4$ ， $n \geq 6$ 的组合，并得到了良好的实验结果；通过大量不同粘度油品实验发现适当增加 h/d 的值，如 $h/d \approx 20$ 分离效果更好；在稠油的情况下，通过 T 型管的预分在顶管出口处，能获得少量 1% 含水率的油。

2.2.3 重力沉降试验

我们认为:衡量重力沉降分离效率的是无量纲时间 $\bar{T} = Au/Sv$, 式中 S 是沉降罐的截面积, A 是输送管道的截面积, u 是液相平均流速, v 是油滴、水滴或气泡的沉降或上浮速度。此外发现液相的黏性和液滴的直径对油滴和气泡上浮或水滴的下沉有非常大的影响。对粒径小于 0.1mm、黏性大于 500MPa·s 黏度的液体, 重力沉降的速度就很慢, 如对 10MPa·s 黏度的油, 油水分离只需几十分钟, 而对 500MPa·s 的油, 油水分离就超过 20h。

通过与计算结果比较, 证明一种连续相介质中另一分散相以液滴和气泡形式存在的假设是符合实际情况的, 这为数值模型的建立提供了依据。

2.3 样机制造及实验

为了检验综合分离的效果, 按油田常用分离器处理量的 1/10 的缩尺比例设计了新的复合式分离器样机, 2005 年 3 月建成并投入使用。图 6a 和图 6b 给出了样机照片。样机总长 4.5m, 宽 2.2m, 高 2.5m, 由不锈钢制成。箱体四周由上、下二根水平管(周长约 15m)和 n 根(目前为 8 根)垂直管组成的 T 型管围绕, 水平管内径为 50mm, 垂直管内径为 40mm, 高度为 800mm, 在水平及垂直管中都配置有一定数量的有机玻璃管, 便于观察 T 型管内油水预分的状况。

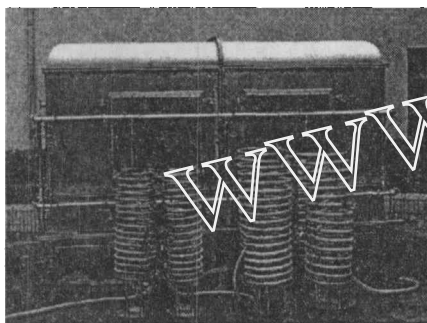


图 6a 样机工厂水压试验

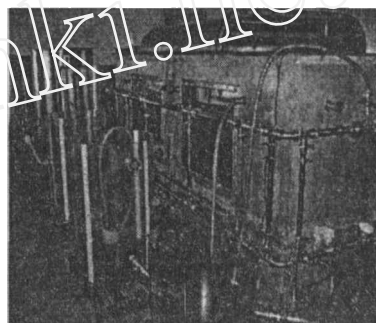


图 6b 样机室内试验

对于不同油品(黏度为 1~1500mPs)主管中流速为 0.2~1.5m/s, 最大日处理量可达 250m³/d, 达到了按 1/10 流量缩尺设计的要求。图 7 给出了一定范围内油水配比条件下分离器各部分流动参数变化规律, 图中各线由油水两相流速和压力组成, 记录了分离前后的变化过程。样机试验结果表明, 我们设计的复合式分离器, 在进口含水率从 0~90%范围内, 出口油中含水都小于 1%, 分离器的总压降损失小于 1.5 个 P., 低于正常工业上使用的重力式分离器压降损失^[3,4]。

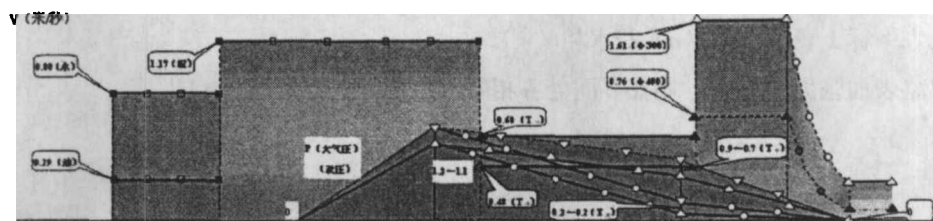


图 7 室内样机实验流动参数变化

2.2 工业样机试验

为检验复合式分离器在真实工况下的分离效果，验证各主要分离部件的匹配和综合效率，2006年10月，我们设计了图8所示的工业样机在华北油田采油二厂岔一联合站安装完毕。目前在准备今年6、7月份的现场实验。实验方案为：复合式分离器经分支管线连接在一级油水沉降罐，来液中含水率在30%左右，经复合式分离器分离后的油水混合后又进入一级油水沉降罐；分离过程中对各环节进行流量计量和取样。图9现场新样机与原有重力式分离器对比。

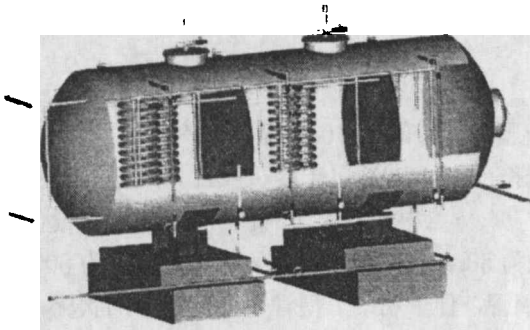


图8 工业样机结构示意图

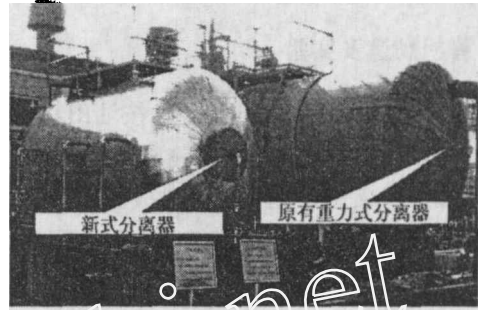


图9 新旧油水分离器对比

3 计算模型

3.1 双流体模型

油水两相均可视为不可压缩流体，并假设两相处于热力学平衡状态，则双流体模型中质量守恒方程和动量守恒方程可以写为：

$$\frac{\partial \alpha_k \rho_k}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_k \rho_k \bar{u}_k) = 0 \quad (k = w, o) \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial (\alpha_k \rho_k \bar{u}_k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_k \rho_k \bar{u}_k \bar{u}_k) = & -\alpha_k \nabla p_k + \nabla \cdot \alpha_k \tau_k + \nabla \cdot \alpha_k \tau_k' + \\ & \alpha_k \rho_k \bar{g} - \alpha_k \rho_k [\bar{\Omega} \times (\bar{\Omega} \times \bar{r}) + 2\bar{\Omega} \times \bar{u}_k] + \bar{M}_k \end{aligned} \quad (2)$$

此处，下标 k 表示油相 (o) 和水相 (w)。

若忽略表面张力的影响，则在界面处各相的压力相等，此时有

$$\bar{M}_w = -\bar{M}_o \quad (3)$$

假定离散相是以液滴的形式存在，相间作用力包括曳力、附加质量力和升力^[5]，表示为：

$$\bar{M}_o = \bar{M}_o^d + \bar{M}_o^{vm} + \bar{M}_o^l \quad (4)$$

式中
$$\bar{M}_o^l = C_l \alpha_o \rho_w (\bar{u}_w - \bar{u}_o) \times (\nabla \times \bar{u}_w) \quad (5)$$

$$\bar{M}_o^{vm} = C_{vm} \alpha_o \rho_w \left(\frac{D_w \bar{u}_w}{Dt} - \frac{D_o \bar{u}_o}{Dt} \right) \quad (6)$$

$$\bar{M}_o^d = \frac{3}{4} C_D \frac{\alpha_o \rho_w}{d_o} |\bar{u}_w - \bar{u}_o| (\bar{u}_w - \bar{u}_o) \quad (7)$$

$$C_D = \begin{cases} \frac{24(1 + 0.15 Re_o^{0.687})}{Re} & , Re_o \leq 1000 \\ 0.44 & , Re_o > 1000 \end{cases} \quad (8)$$

此处, d_o 为油滴的直径, Re_o 为油滴的雷诺数。

3.2 湍流模型

与单相流动相比, 多相流动中的湍流模型要复杂得多, 其中应用最广泛的是 $k-\varepsilon$ 模型。当分层流及相密度比接近于 1 时, 利用混合湍流模型可以对湍流特性进行很好的捕捉^[6,7]。

混合湍流模型中, k 和 ε 的方程分别为:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_m k) + \nabla \cdot (\rho_m \vec{u}_m k) = \nabla \cdot \left(\frac{\mu_{t,m}}{\sigma_k} \nabla k \right) + G_{k,m} - \rho_m \varepsilon \quad (9)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_m \varepsilon) + \nabla \cdot (\rho_m \vec{u}_m \varepsilon) = \nabla \cdot \left(\frac{\mu_{t,m}}{\sigma_\varepsilon} \nabla \varepsilon \right) + \frac{\varepsilon}{k} (C_{1\varepsilon} G_{k,m} - C_{2\varepsilon} \rho_m \varepsilon) \quad (10)$$

式中, 混合密度 ρ_m 和混合速度 \vec{u}_m 的定义式可写为:

$$\rho_m = \sum \alpha_k \rho_k \quad (11)$$

$$\vec{u}_m = \frac{\sum \alpha_k \rho_k \vec{u}_k}{\sum \alpha_k \rho_k} \quad (12)$$

湍流黏度 $\mu_{t,m}$ 和湍流动能 $G_{k,m}$ 可表示为:

$$\mu_{t,m} = \rho_m C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (13)$$

$$G_{k,m} = \mu_{t,m} \left[\nabla \vec{u}_m + \left(\nabla \vec{u}_m \right)^T \right] : \nabla \vec{u}_m \quad (14)$$

各常数的取值与单相流动时相同, 即 $C_\mu=0.09$, $\sigma_k=1.0$, $\sigma_\varepsilon=1.3$, $C_{1\varepsilon}=1.44$, $C_{2\varepsilon}=1.92$ 。

3.3 计算与实验结果比较

3.3.1 直管内的油水两相流动

为验证双流体模型，首先对直管内的油水两相流动进行了数值模拟。模型尺寸与实验管路一致，即直径 0.05 m，管路长度 15.0 m。油、水的物性参数及入口工况见表 3：

表 3 介质物性及入口条件

介质	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	黏度/($\text{MPa} \cdot \text{s}^{-1}$)	入口流速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	截面相含率
LP-14 白油	836.0	31.0	1.0	0.305
水	998.0	1.003	1.0	0.695

图 10 为距离入口 5 m 和 9 m 处管路截面上含油率分布云图，图 11 中为含油率沿管路的变化趋势云图，与实验观察相符。

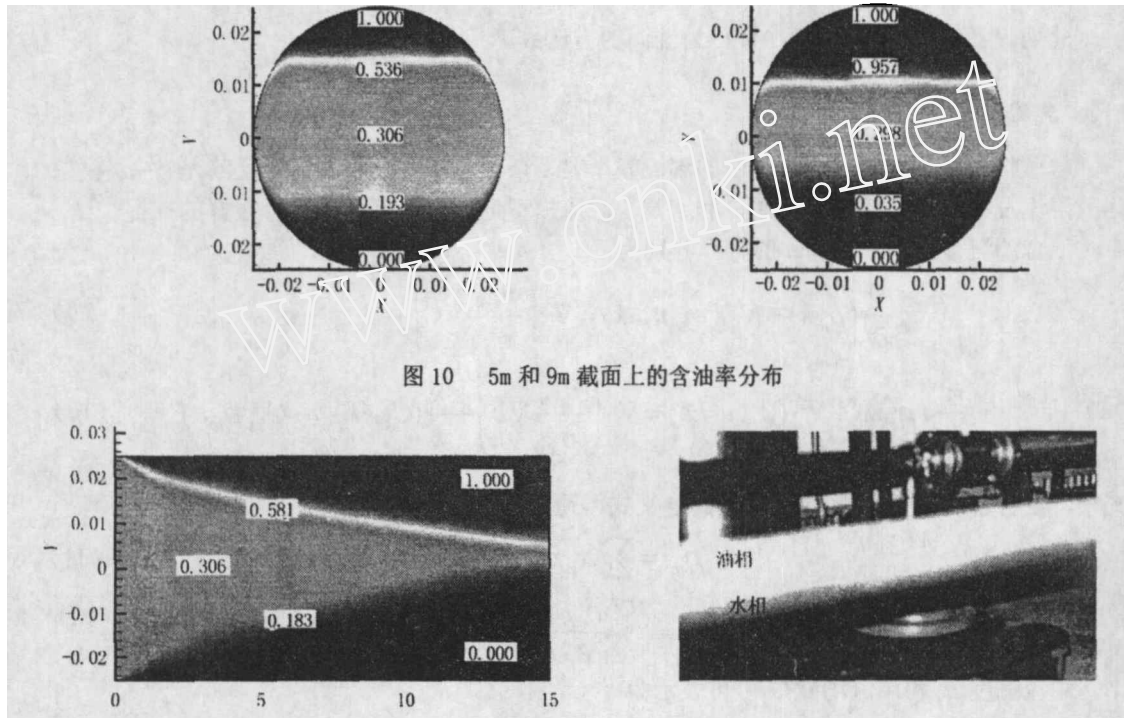


图 10 5m 和 9m 截面上的含油率分布

图 11 油相组分随管路长度变化的计算结果与实验照片

3.3.2 储罐中的油水分离

采用二维模型来模拟油水两相的分离过程，根据储罐实际尺寸取模型高度为 0.41 m，宽度为 1.0 m。油、水的物性参数同上。

图 12 为油滴直径 0.2 mm 情况下，静置 100 s 时油水两相的分离结果。可以看出，油水两相逐渐发生分离，混合层厚度减小，与实验观测结果相一致。

对油滴直径为 0.1 mm、0.15 mm、0.2 mm、0.25 mm 时的油水分离过程进行了数值模拟。图 13 为水层高度随时间的变化情况，结果表明水层高度呈线性增长，与实验结果符合较好。

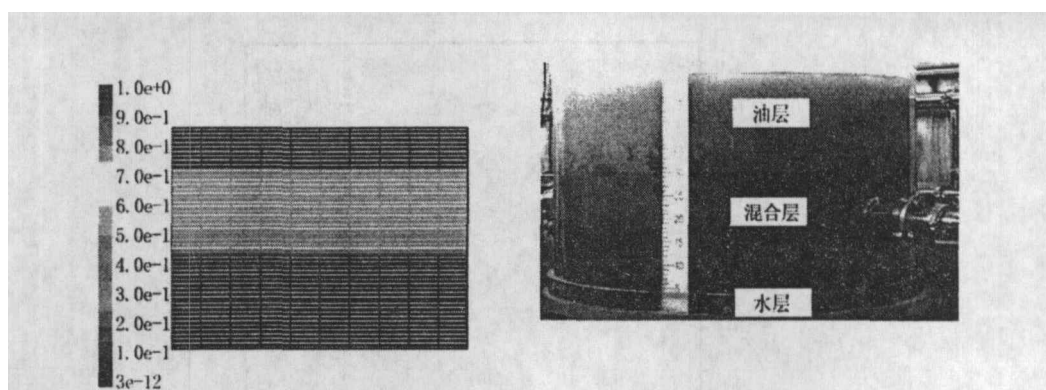


图 12 油滴直径 0.2mm，静置 100 s 时的分离结果

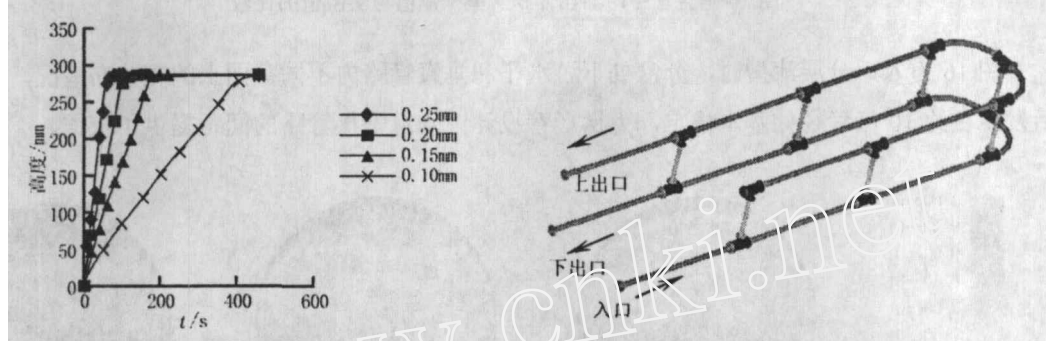


图 13 不同油滴直径下水层增长曲线

图 14 梯形管三维效果图

3.4 计算应用

在对梯形管和螺旋管进行设计时，结合了数值模拟和实验研究两种手段，从而缩短了研制周期，得到了装置的最优组合。

3.4.1 梯形管

梯形管的结构如图 14 所示。本文采用双流体模型，首先对单分岔管路内的油水两相流动进行了数值模拟，并与实验数据进行了比较^[8,9,10]，表 4 为模拟实验工况。

表 4 模拟实验工况

实验序号	流型	混合流速/(m·s ⁻¹)	含油率/%	水相折算速度/(m·s ⁻¹)	油相折算速度/%
# 1	ST&MI	0.54	44.4	0.30	0.24
# 2	DS	1.80	25.0	1.35	0.45

注：ST&MI 为带有混合层的分层流型，DS 为分散流型。

由图 15 看出，不同流量配比下垂直管路内油相体积含率的计算结果与实验值比较吻合。

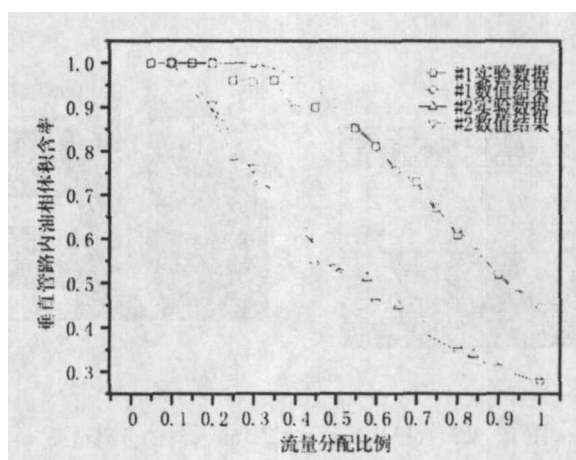


图 15 垂直管内油相体积含率预测值与实验值的比较

图 16 为入口分层流型时，分岔处下游水平和垂直管路内不同截面上的相分布情况，分析后发现在约 10 倍管径处基本稳定，为梯形管设计中确定垂直管路的间距提供了依据。

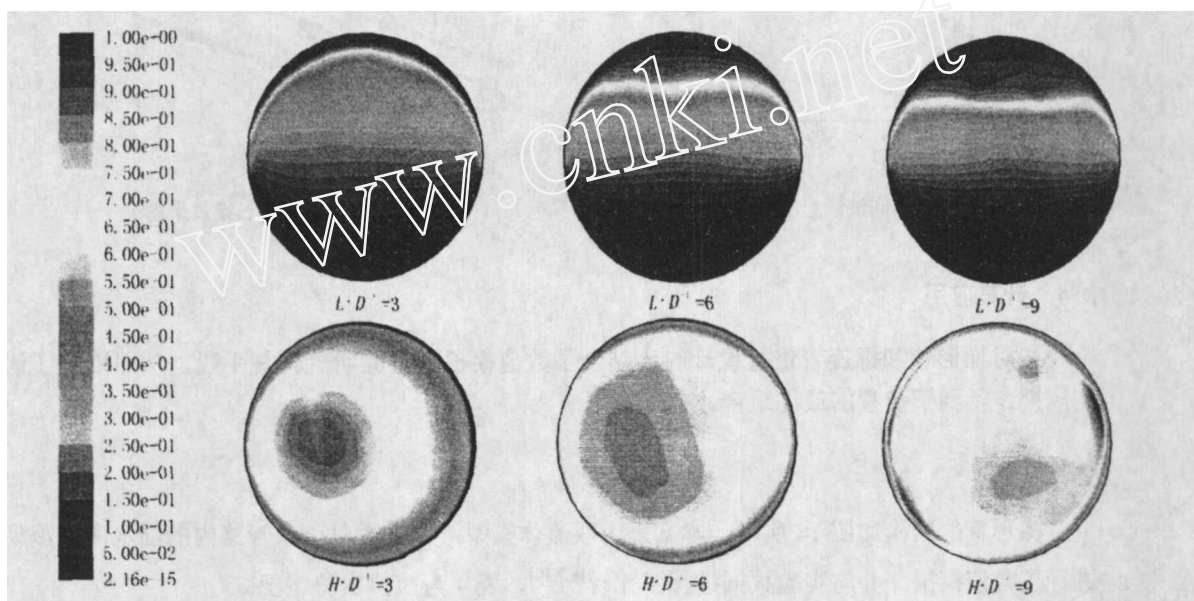


图 16 分岔处下游水平管和垂直管截面上的含油率分布

3.4.2 螺旋管

在实验研究的基础上，对不同尺寸螺旋管内的油水两相流动进行了数值模拟^[11-14]。图 17 为螺旋管的几何模型，管径 0.04 m，旋转半径 0.40 m，螺距 0.10 m，入口位于螺旋管下端。

图 18 为入口流速 1.0 m/s、含油率 0.305 时第一、五圈管路末端截面上的油相分布情况，可以看出在重力和离心力的作用下，水相位于管截面的右下方，油相则相应的集中于管路的左上方。根据这样的计

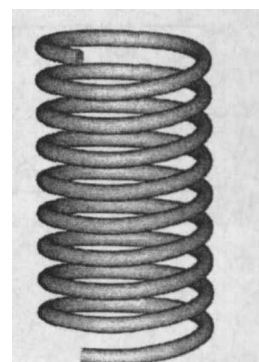


图 17 螺旋管模型

算结果，在螺旋管外壁面下方适当位置处开设了一定数目的出流孔，以引出管路内的水相，从而达到油水两相分离的目的。

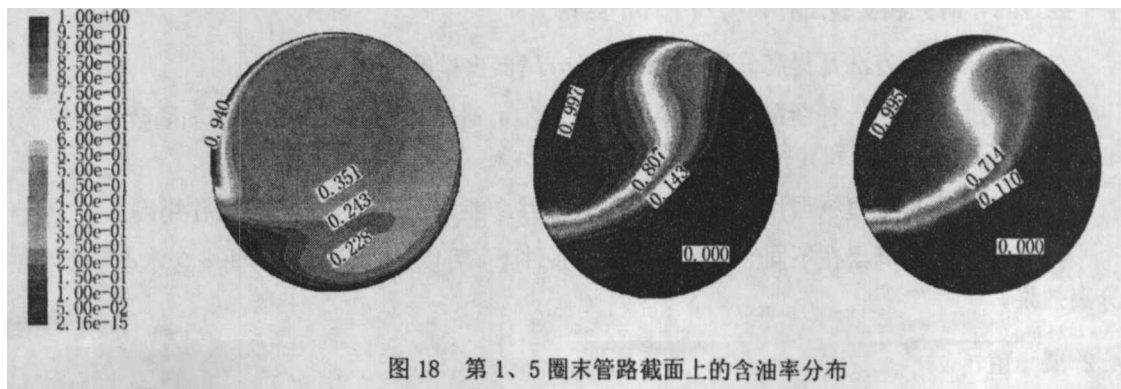


图 18 第 1、5 圈末管路截面上的含油率分布

在对螺旋管开设出流孔后，整个螺旋管可分为入口稳定段和分离段。在分离段的各圈管路上，开设了不同数目、不同直径的出流孔。对带孔螺旋管内的油水两相流动进行了数值模拟^[15]。如图 19 所示，螺旋管出流孔处水相体流量的计算值与实验值比较吻合，说明双流体模型能够很好地模拟油水两相在螺旋管内的流动。

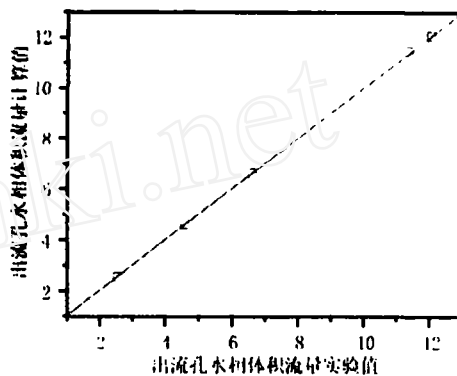


图 19 出流孔水相体积流量实验值与计算值的比较

图 20 为第 9 圈管路上，不同出流孔处管路截面上油的相分布图。可以看出，含水率较高的油水混合物从出流孔流出，随着油水两相继续在管内流动，管路截面上的含油率逐渐上升，表明在开设出流孔后螺旋管能够有效的对油水两相进行分离。

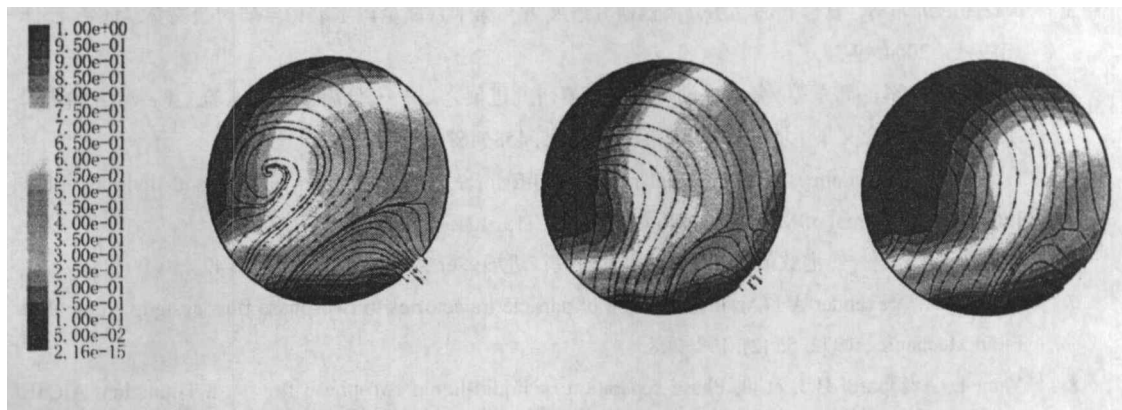


图 20 出流孔处管路截面上的含油率分布

4 结论

4.1 经过几年研究和实验工作, 得到了如下结论

- (1)复合式分离方法是提高分离效率, 减轻分离器重量的有效途径之一;
- (2)带孔螺旋管是一种新型离心分离部件, 通常可通过减少回转半径, 增加圈数来提高离心力。开孔数量、位置和孔径对分离效率有显著影响;
- (3)具有膨胀和重力原理预分效果的 T 型管部件, 能起到良好的气液预分作用;
- (4)本复合式分离器在不同油品和油水配比条件下, 可以达到分离后的油中含水小于 1% 的分离效果。

4.2 展 望

在工业样机现场实验的基础上, 复合式油水分离器准备进入工业推广应用阶段。针对大庆油田高含气工况下的分离器研制任务, 我们将对现有的油水分离器结构进行改造, 以适应更苛刻的生产环境的要求。

目前, 我们还在准备中国海洋石油天然气总公司渤海油田海上平台的复合式分离器样机的设计与制造。

除了要达到油中含水的指标外, 对于水中的含油率还需要进一步降低, 以达到环保排放要求, 为此将要进行分离部件的参数优化设计。

参 考 文 献

- 1 中国科学院力学所. 中国科学院知识创新工程重大项目可行性研究报告. 2002.
- 2 郑之初, 周永, 郭军, 等. 海上油气混输中的分离技术. 见: 香港: 第十七届水动力学研讨会论文集, 2004, 830-837.
- 3 郑之初, 郭军, 等. 复合式油气水分离器研究进展. 见: 第十八届全国水动力学研讨会文集. 北京: 海洋出版社, 2004. 49-58.
- 4 郑之初, 张军, 郭军, 等. 复合式油气水分离器研究进展之二——分离器样机试验. 见: 第十九届全国水动力学研讨会文集. 北京: 海洋出版社, 2005. 458-467.
- 5 D A Drew, R T Lahey Jr. The virtual mass and lift force on a sphere in rotating and inviscid flow. *International Journal of Multiphase Flow*, 1987, 13: 113-121.
- 6 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.
- 7 Morsi S A, Alexander A J. An investigation of particle trajectories in two-phase flow systems. *Journal of Fluid Mechanics*, 1972, 55 (2): 193-208.
- 8 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.
- 9 Yang L, Azzopardi B J. Phase split of liquid-liquid two-phase flow at a horizontal T-junction. *International Journal of Multiphase Flow*, 2007, 33 (2): 207-216.

- 10 Pandey S, Gupta A, et al. Liquid-liquid two phase flow through a horizontal T-junction. *Chemical Engineering Research and Design*, 2006, 84 (A10): 895-904.
- 11 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*, 2004, 19(4):540-546.
- 12 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
- 13 高琪,吴应湘,刘秋生,等.螺旋管内油水分离两相流动的数值模拟. *水动力学研究与进展*, A辑, 2005.
- 14 Zhang jun, Guo jun, Gong Dao-tong, et al . An investigation on oil/water separation mechanism inside helical pipes. *Proceedings of the conference of global Chinese scholars on hydrodynamics*. 2006,343-347
- 15 龚道童, 吴应湘, 郑之初等. 变质量流量螺旋管内两相流数值模拟. *水动力学研究与进展*, 2006, 21(5):640-645.

Summarization and forecast of combined separators

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

(Institute of Mechanics, CAS, Beijing, 100080)

Abstract: In this paper, the work in developing combined separators in the past 6 years by our team is summarized. Initially a technical method integrating gravitational force, centrifugal force and expansion was proposed. A highly efficient combined oil/water separator, including helical coiled tubes and T-junctions, was designed and manufactured through experiments and numerical simulation, and the results indicated that the volumetric percentage of oil in water is not more than 1%, an advanced international level in the petroleum industry, while the combined separator is more compact than those with similar handling capacities. At present, a newly manufactured prototype, 2.4 m i.d. and 6.0 m long, has been installed in Hua'bei oilfield, Ba'zhou city, to conduct industrial application experiments.

As for academic research, the oil/water two-phase flow inside T-junctions and helical coiled tubes with discharging holes on the wall is numerical simulated using commercial software, Fluent, and both the computed flux and phasic volume fraction are in good agreement with experiment data.

Key words: multiphase flow, combination-type separator, oil-water separation experiments, T-shape pipes, spiral, numerical simulation