

# 复合式油气水分离器研究进展<sup>\*</sup>

郑之初 郭军 张军 周永 唐驰

(中国科学院力学研究所,北京 100080)

**摘要** 油气水的高效分离是陆上和海上油田在油气生产、输运、存储中关注的问题,复合式分离方法是近期的发展方向,目前有报道的最佳效果是分离后油中含水接近1%。本文介绍中国科学院力学所发展的新型复合式油气水分离器和已建成的油气水分离模拟实验设备。当前,在不同流量、不同油水配比和不同油品条件下,对于油水重力沉降机理,各种螺旋管离心分离效率,T形管气液分离效果,以及乳化对油水分离的影响几个方面,开展了大量的实验研究并取得相应的进展。同时,在油水两相液滴模型的假设下,开展了直管和螺旋管的数值模拟计算,计算和实验结果比较后得到一些有益的结论,这对于高效油气水分离器定型有决策性作用。

**关键词** 油气水分离,复合式分离器

## 1 前言

随着石油工业的发展,陆上油田油、气、水、砂分离技术和生产工艺日臻完善。但海洋石油的大规模开采,对油、气、水的多相分离技术又提出了新的挑战。由于海洋平台或海底水下生产系统的操作空间和承载重量受到严格限制,它要求装在海上平台和海底使用的油气水分离器一般具有结构简单、体积小、重量轻、分离效率高、处理量大、容易安装维护、安全可靠,能适应多相流各种流态,分离后油中含水小于1%,水中含油小于40mg/L等技术指标,这是传统的重力式分离装置很难达到的。因此开发一种小型、高效、快速的油气水分离设备既可以节省平台空间,又能提高工作效率,对在建和将建的海上油气田,特别是采用混输方式的海上油气田具有十分重要的意义<sup>[1,2]</sup>。

“十五”期间中国科学院与中国海洋石油总公司重大科技合作项目中列入了上述研究课题。在总结以往研究成果的基础上,力学所提出了结合离心、重力、膨胀、振动多种分离原理于一体的高效分离器设计方案(见图1)和实施途径<sup>[3]</sup>。2003年底,建成了可以模拟油气水复合式分离器关键部件原理实验的实验装置,开展了一些关键技术的实验。本文主要介绍在不同流速、不同油水配比和不同油品条件下,在油水重力沉降机理,各种形式螺旋管离心分离效率,T形管气液分离效果等方面的研究进展。并将实验结果与数值模拟结果比较,得到的一些结论已用于高效油气水分离器的定型设计。

\* 中国科学院与中国海洋石油总公司科技合作项目;中国科学院“十五”重大项目(KJCX2-SW-L03)

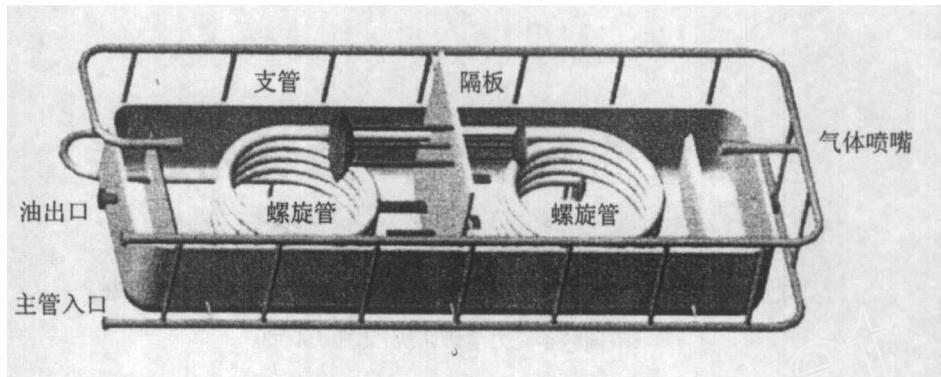


图 1 分离器模型

## 2 实验设备简介

建成的油气水模拟实验设备是由储油罐、储水罐、射流混合器、供气系统、水循环系统、油循环系统,以及计量系统等部分组成。主管直径 50mm,使用德国 CHI 和丹麦 AP 系列水泵及国产 RCB 系列油泵,能保证管内油水混合物的最大流速达 2m/s。油水配比可在 0%~100% 范围内调节;设置的意大利 Fini-BK20 空气压缩机,其最大工作压力为 1.0MPa,通过储气罐和调压系统后,可保证单相时管内气体最大流速为 50m/s。用自行研制的射流混合器可使油水均匀混合,并可以实现油气水三相混合时水平管及垂直管中,如泡状、弹状、长栓、环状等各种流态。图 2 为设备系统原理示意图;图 3 为建成后设备的全貌照片。

目前,我们在几个直径 700mm、高度 800mm 的有机玻璃容器中观察气泡、油滴和水滴的重力分离;在表 1 所示尺寸的螺旋管中进行不同流速、不同油水配比、不同油品条件下油水混合物的离心分离实验;在 T 形管中进行油气水在膨胀、重力作用下气液预分实验。

表 1 螺旋管的结构尺寸 (单位:mm)

螺旋管	D40 管	D25 管
回旋半径 $R$	400	150
管直径 $D$	40	25
螺距 $T$	100	100
螺旋圈数	6	12
总高度 $H$	600	600

实验室准备了三种实验用矿物油,LP-14、PS、LP-15白油在20℃下黏性系数分别为25、78、1350mPa·s;还从渤海油田“缓36-1”取得原油,40℃下黏性系数为 $1\ 793\text{mm}^2/\text{s}$ 。实验室内可在比较广泛的范围内进行关键部件的油气水分离模拟实验。

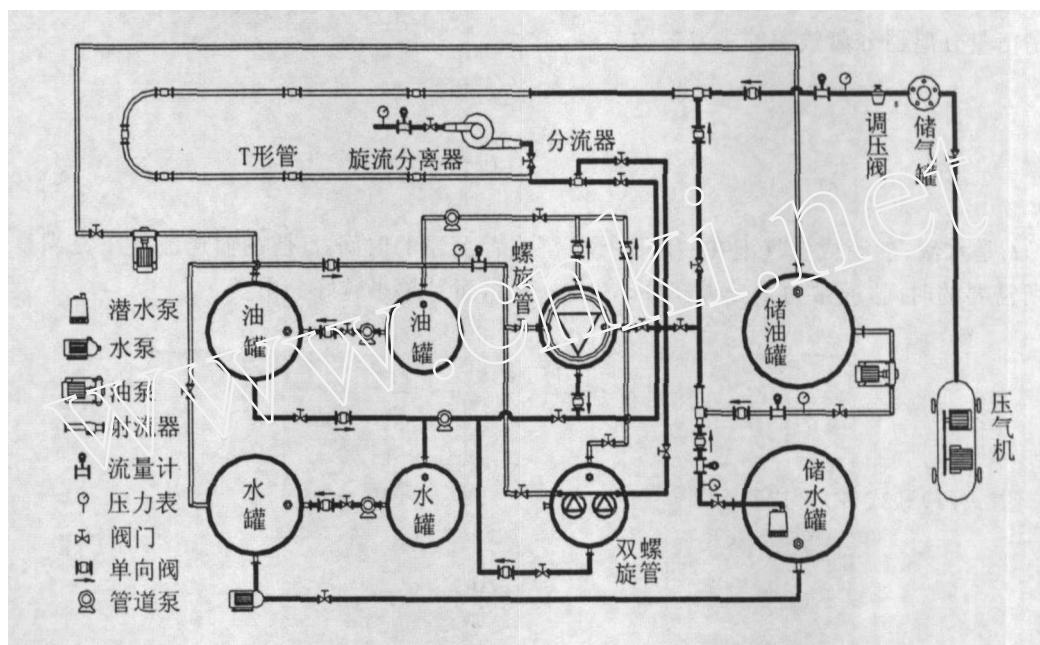


图2 油水分离实验系统



图3 实验设备全貌照片

### 3 重力沉降实验

通常工业上用密闭的圆柱形筒体作重力沉降罐,利用密度差使油气水分离。无量纲时间  $\bar{T}$  是衡量分离器分离效率的主要参数。

$$\bar{T} = \frac{t_d}{t_f} \quad (1)$$

$t_d$  是水滴、油滴或者气泡在一定高度下沉或者上浮的时间,  $t_f$  是在输送流量下充满整个容器所需要的时间, 通常为了分离充分,  $\bar{T}$  应小于 1, 而且越小越好。由于

$$t_f = \frac{sH}{Au}, \quad t_{d,max} = \frac{H}{v} \quad (2)$$

由式(1)和式(2)可以得到

$$\bar{T} = \frac{Au}{Sv} \quad (3)$$

式中:  $S$  是沉降罐的截面积,  $A$  是输送管道截面积,  $u$  是液相平均流速,  $v$  是油滴、水滴或者气泡的沉降或上浮速度。 $v$  随液滴、气泡直径和介质黏性变化, 一般来说是很小的值。所以, 为使  $\bar{T}$  很小, 在一定的输送管道下  $S \gg A$ , 现在陆上油田有 22m 甚至 50m 直径的沉降罐, 并且采用多个组合进行重力沉降分离。

水滴在油中沉降的速度  $v$  的计算方法如下<sup>[3]</sup>,

$$v = \frac{d^2 g (\rho_w - \rho_o)}{18\mu_o}, \quad Re \leqslant 2 \quad (4)$$

由于油(尤其是稠油)和水密度相差很小, 而黏度比水大很多, 一般水滴直径  $d$  很小, 按照式(4)得到的  $v$  非常小。为此我们在实验中对重力沉降时间和现象进行了细致的观察, 为了观察方便, 用高锰酸钾把水染成红色, 通过射流混合器将无色的油和水均匀混合。在有机玻璃管道中可以看到油水与微量的气体形成液滴状混合物。停止流动后, 油水在重力下很快分层(如图 4)。

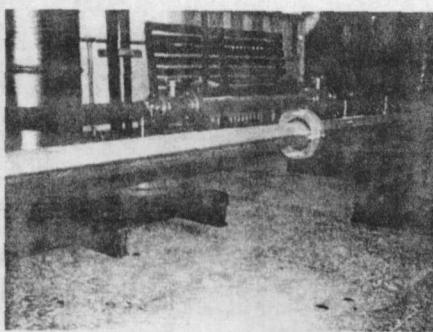


图 4 管中油水的重力分层

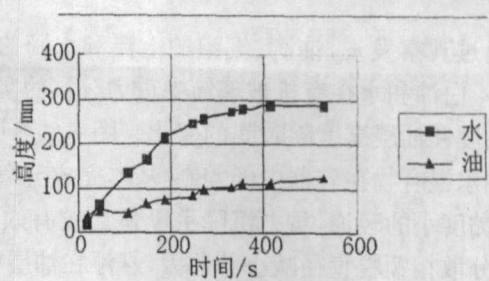


图 5 容器内油水分离随时间的变化

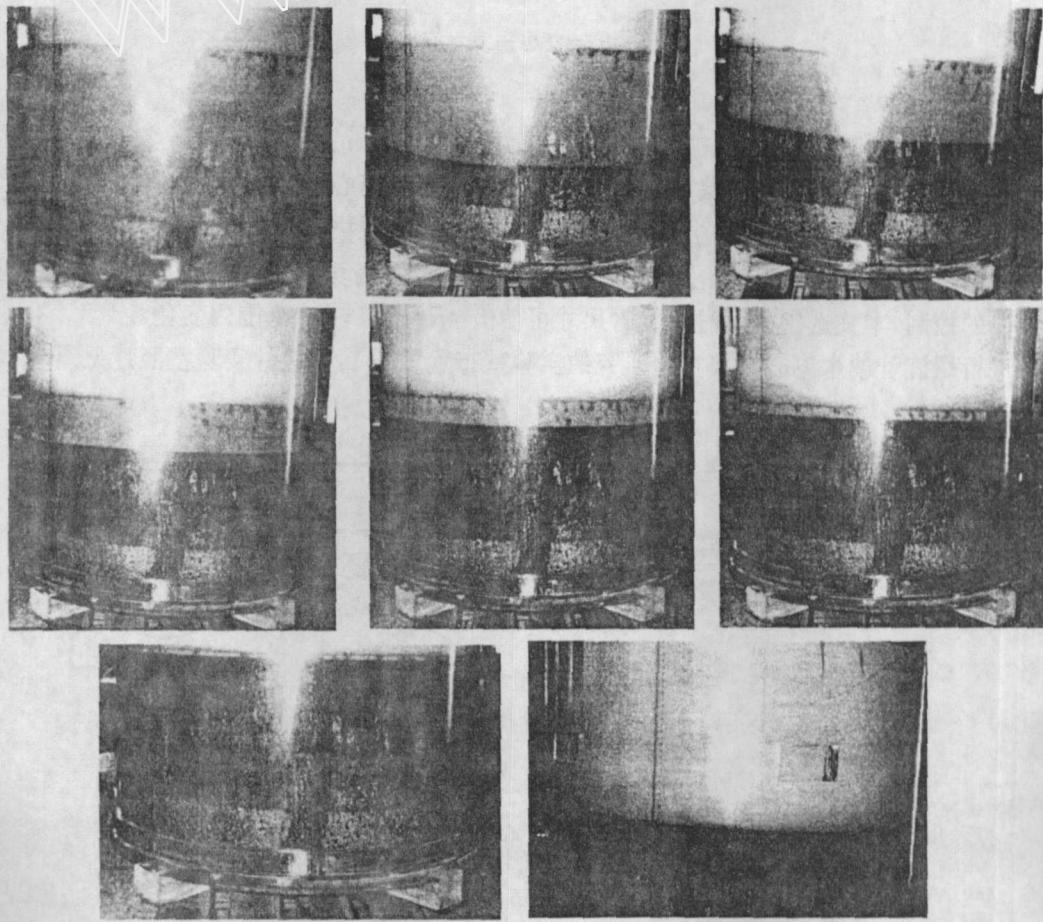


图 6 容器内油水分离随时间的变化

通过观察发现,油滴、气泡的上浮和水滴的下沉确实是重力沉降中的主要形式。图 5 为 LP-14 白油和水在有机玻璃筒中重力分层的实验曲线,混合液含水率 0.70,图中给出容器中水层高度和油层高度随时间的变化。图 6 的 8 张照片为每隔 60s 拍摄的容器中分层的状况。

油水混合物在容器中经 480s 基本完成分离,油层、水层中悬浮的分散相较少。可见对密度小、黏度小的轻油,重力沉降手段是比较有效的。在 PS 白油实验的观察中显示,由于粘度较大,分散相颗粒直径减小等原因,悬浮在油层中的水滴以及水层中的油滴需要几十分钟分层完毕,十几小时才可完全分离。这些现象为我们研究油水重力沉降机理和容器设计提供了实验依据。

#### 4 螺旋管离心分离实验

油水或者气液的离心分离的动力来自离心力差,单位体积的离心力差  $F$  按如下计算,

$$F = (\rho_i - \rho_o) \frac{u^2}{R} \quad (5)$$

由于气液两相密度差在 1 000 倍左右,因此在相同流速  $u$  及回旋半径  $R$  条件下,气液的离心分离效果是非常明显的。考虑到载体的重力作用,油水离心分离应由  $\rho_w/\rho_o \cdot u^2/Rg$  两个无量纲量支配,对于稠油因为  $\rho_w/\rho_o \approx 1$ ,所以离心分离主要取决于  $u^2/Rg$  的大小。

通常螺旋管回旋半径的大小受到制造工艺的限制,而流动速度的大小受到自身能量和压降损失的控制。本文选定的两种螺旋管尺寸可使  $u^2/Rg$  在 1~10 范围内变化。

进行螺旋管油水离心分离实验研究的实验室布置见图 7,相应的实验室照片见图 8。

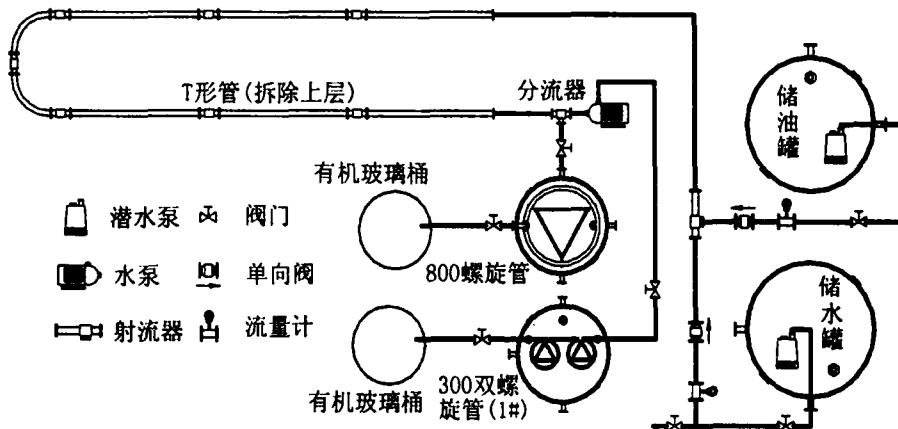


图 7 螺旋管油水分离实验系统

我们设计了两种螺旋管(图 9),在上面三圈打有小孔,每圈的孔径、孔数可相同或变化,经

过螺旋管离心分离后的水相对油在管道外侧,选择合适的开孔位置,即可将大部分的水导出,管道中剩余的混合物中油的含率较高,收集到有机玻璃筒中。实验研究试图找出适合人口流动参数的螺旋管的合理尺寸,以及开孔的位置、数量和方向。

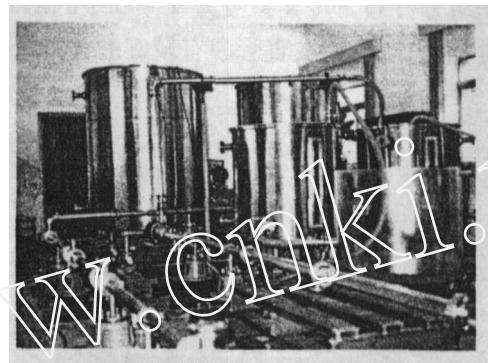


图 8 螺旋管实验布置

通过不同配比、不同流速下各种螺旋管的实验,我们认为在工艺许可条件下,应优先考虑缩小螺旋管的回旋半径,  $R = 300 \sim 400\text{mm}$  的旋转半径在小于  $15\text{t/h}$  混合液量的条件下是合适的。而受到压强损失的限制螺旋管的内径可选用  $D = 30\text{ mm}$ , 压降损失  $\Delta p$  大约为  $700\text{mm}$  水柱(油的粘性系数小于  $100\text{mPa} \cdot \text{s}$ )。

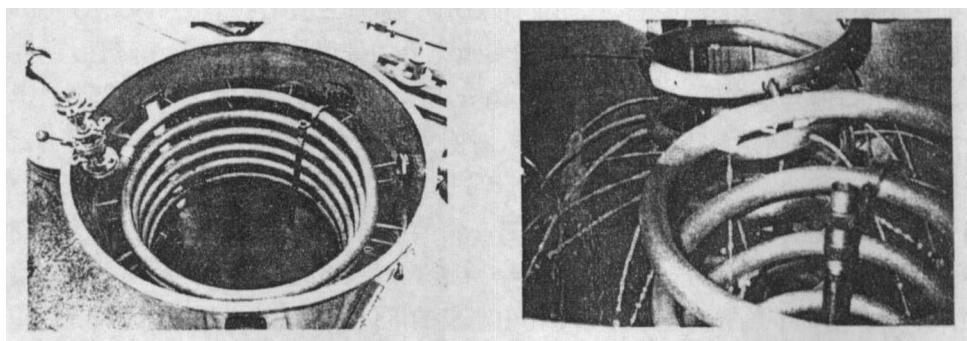


图 9 螺旋管中流动状况

从实验的结果看,选择的螺旋管孔数应适当减少,孔径也应减小,因为在现在的实验中伴随水流出的油也较多,这是离心力作用时间不够长,以及孔流量太大造成的影响。为此,我们设计了新的螺旋管,其实验正在进行,预期会有更好的结果。

## 5 数值模拟与实验结果比较

我们使用 Fluent 软件,选定油水两相流动的基本方程和湍流模型,在液滴模型的假定下,

用 Euler-Euler 法和 Euler 模型,对直管和螺旋管中油水两相的流动进行了数值模拟<sup>[4]</sup>。根据实验的参数选择计算的流动参数、油水物性及结构参数,通过实验比较,可以判断计算模型的准确性。

图 10 给出了直管油水分离中,靠近管道下壁面油组分沿轴向的变化。图 11 为距混合段 12m 截面处管内油的体积组分分布。定义参数为  $d = 0.1 \text{ mm}$ ,  $u = 1 \text{ m/s}$ 。可见在管长  $L$  超过 10m,既  $L/D > 200$  时,油水混合物在直管中有较好的分离效果。

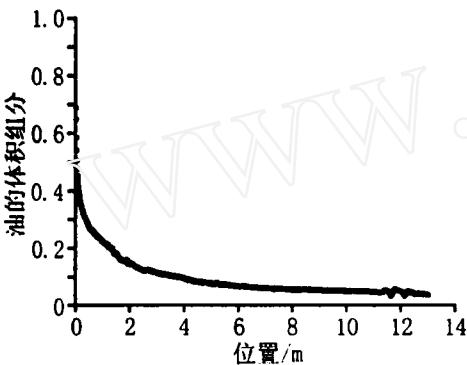


图 10 近管下壁面油的体积组分沿轴向的变化

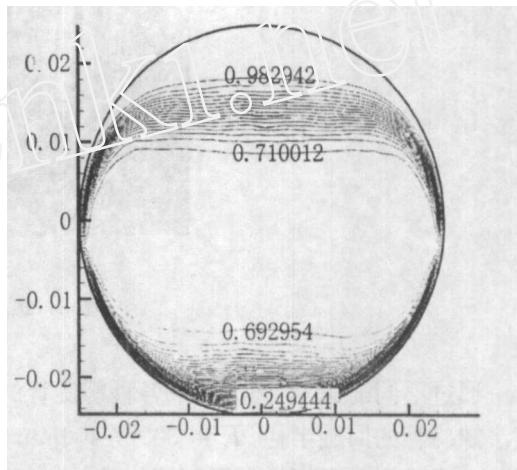


图 11 距混合段 12m 截面上油的体积组分

根据管中油水重力分层的原理,我们设计了分流器,即在直管出口进行油水预分,然后再进入螺旋管,这样可以提高分离效率,实验的实施充分的证明了这一点的正确性:经过分流器分流后,两个出口的含水率明显不同。图 12 为分流后,分别从上下两个不同管路的螺旋管中取样的照片。图中左侧为上部管路中的取样,右侧为下部管路中的取样。经计算,分流后的含水率分别为 0.419 和 0.466,表明使用分流器可以提高油水的分离效率。

图 13 给出螺旋管中油水两相在重力和离心力共同作用下的分离计算结果。螺旋管采用 D40 管模型尺寸(表 1 所列),定义参数为  $d = 2 \text{ mm}$ ,  $u = 1 \text{ m/s}$ 。图中为分离一圈后管道截面上油的体积组分分布。由图中可见,要使孔中流出的液体水多油少,开孔应设置在管道外侧偏下处。为此,我们在新的螺旋管中做了相应的修正。

## 6 结论与展望

通过实验研究和初步数值模拟计算,我们在高效油气水分离器的设计方面得到了一些有益的结论:

- (1) 本文提出的采用离心力、重力、膨胀、振动多种分离原理于一体的高效分离方案是一个切实可行的方案,对关键部件作适当修正后可开始样机设计以考核其工业应用效果。
- (2) 螺旋管分离器是一种新型的离心分离部件,适当选择回旋半径、管径,掌握好开孔位置及孔径大小会有良好的分离效果。如果与分流器综合使用分离效率会更高。

(3) 重力沉降是分离的可靠手段,对黏度小的油品乳化并不重要,分离效率会比较高;对粘度高的稠油由于油气水三相形成的液滴相互混掺,细化了分散相粒径,加上粘度影响,上浮或者下沉速度大大降低,必须采用辅助的有效措施。我们认为加热升温会是一个可用的途径,有待进一步的实验证实。

(4) 膨胀和重力原理复合使用的 T 形管部件是气液预分中的重要分离部件,它可以进行油气水混合物的脱气预分,另外也可加快油水分层,提高整体分离效率。

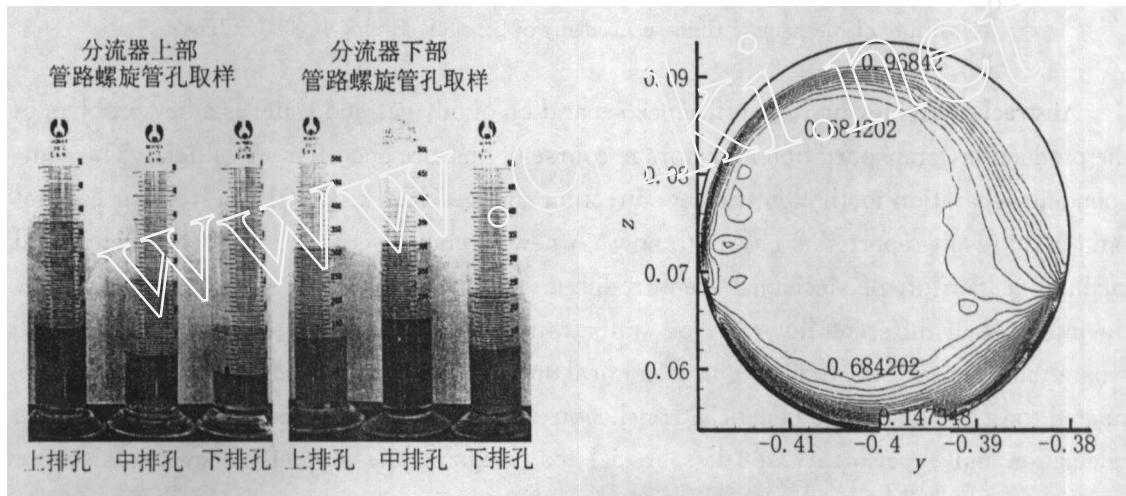


图 12 分流后不同管路中螺旋管内取样

图 13  $d=2\text{mm}$ , 第一圈末截面上油的体积组分

## 参 考 文 献

- 1 Ram S. Mohan, Ovadia Shoham. Design and Development of Gas-Liquid Cylindrical Cyclone Compact Separators for Three-Phase Flow. Dallas: Oil and Gas Conference-Technology Options for Producers' Survival [C]. 1999.
- 2 Frank Th. , Schneider J. , Yu Q. , Wassen E. . Experimental and Numerical Investigation of Partical Separators in a Symmetrical Double Cyclone Separator. California: Proceedings of ASME/JSME Joint Fluids Engineering Conference[C], 1999.
- 3 郑之初,周永,郭军,张军.海上油气混输中的分离技术.香港:第十七届水动力学研讨会论文集[C]. 2004,830-837.
- 4 周永,吴应湘,郑之初,李清平,刘秋生.油水分离技术研究之——直管和螺旋管的数值模拟[J].水动力学研究与进展, Ser. A, 已收录.
- 5 郑之初,赖英旭.海上油气长线混输方法评述.澳门: 第十六届全国水动力学研讨会文集[C]. 2002, 11.

# **Some developments in the combined oil-gas-water separator**

Zheng Zhi-chu    Guo Jun    Zhang Jun

Zhou Yong    Tang Chi

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

**Abstract:** Achieving high-efficiency separation of oil, gas and water is a key problem in the production, transportation and storage course of onshore and offshore oilfield. The compounding separation method is the new direction emerged lately, and the best water content ratio in oil result reported is 1% up to now. A new combined separator and the experimental facilities at Institute of Mechanics are introduced. Based on the gravity sedimentation theory, the influence of different flowrate, oil-water ratio, oil type, helical pipe, T-shape pipe to separation efficiency is studied. The numerical simulation of straight and helical pipes is calculated too. Finally, some beneficial conclusions are gained through comparing the results of calculation and experiment, and it's crucial for designing the high-efficiency oil-gas-water separator.

**Key words:** oil-gas-water separation, combined separator