

# 复合式油气水分离器研究进展之二

## ——分离器样机试验

郑之初 张军 郭军 龚道童 唐驰

(中国科学院力学研究所, 北京 100080)

**摘要** 2003年前在陆地和海上油田的油气生产、输送和存储中关注的油气水高效分离问题研究方面, 中国科学院力学研究所提出了集重力、膨胀与离心三种原理于一体的复合式油气水分离器。其中螺旋管、梯形管分离是离心分离和膨胀、重力分离的重要手段。2004年在中科院力学所建成的油气水分离模拟试验设备上, 对不同油品、不同油水配比和不同流量条件下, 进行了梯形管和螺旋管的分离性能试验和数值模拟计算, 得到了重要的分离器部件设计准则, 如: 在螺旋管的设计方面应采用小回转半径, 多圈数的螺旋管, 在达到大流量分离目的时, 用多个螺旋管并联比串联压降损失要小很多; 在梯形管设计方面通过控制垂直管高度、内径和数量可以达到膨胀与重力分离的双重效果。在组合应用梯形管和螺旋管等分离部件条件下, 对不同油品、油水比进行试验, 得到了分离后油中含水率小于1%的当代国际先进水平, 获得了突破性进展。

目前, 综合上述成果, 按工业使用分离器处理量的1/10缩尺比例设计了新的复合式油气水分离器, 样机长4.5m、宽2.2m、高2.5m, 全部由不锈钢制成, 2005年3月底在中科院力学所实验室内已安装完毕, 并开展了样机的模拟实验。在与目前国内最先进的油气水分离器处理量相同的情况下, 可降低分离器重量15%左右, 从实验结果看来还有潜力。在此基础上, 下一步将设计全尺度的复合式油气水分离器, 用于2005年下半年的陆上油田工业现场试验以考核它的最终指标。

**关键词** 油气水分离, 复合式分离器

### 1 引言

用于海洋采油平台或海底水下生产系统的分离器, 应具有结构简单, 体积小, 重量轻, 分离效率高, 处理量大, 安全可靠, 容易安装维护, 并能适应多相流各种流态等特点。上述要求使这类分离器的研制成为海洋石油开采和输送中亟待解决的关键技术。

---

中科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 (KJ CX2-SW-L03)。

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，并提出油水分离后要达到油中含水小于 1% 的当代国际先进的技术指标。经过大量文献、专利调研，结合国内陆上油田几个达到高精度分离指标的分离装置的考察，中科院力学所指出：各种分离原理综合使用，取长补短是当前分离技术的重要发展方向，例如：目前国际上能达到油中含水低于 1% 指标的也只是美国的一个四级重力和离心相结合的分离器专利<sup>[1]</sup>。为此我们提出了结合离心、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），并制定了实施项目的技术途径<sup>[2]</sup>，它以实验研究为主，在实验中分项考核离心、重力、膨胀原理对油气水分离的有效程度。

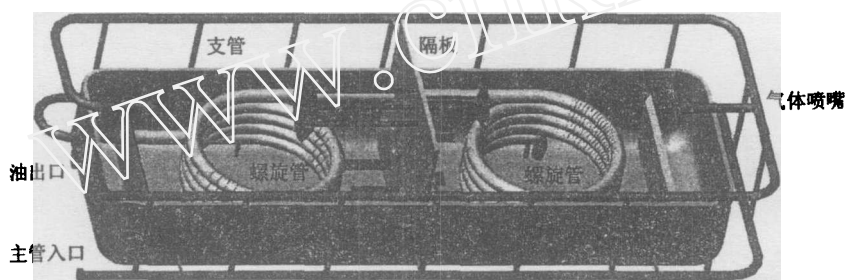


图 1 分离器模型

2003 年底，力学所建成了可以模拟油气水复合式分离器关键部件原理试验的实验装置（详见图 2），在此基础上进行了不同油水比和不同油品条件下，各种形式螺旋管离心分离效率，T 型管气液分离效果和油水重力沉降机理的实验研究，同时，结合直管、螺旋管以及容器中重力和离心分离的数值模拟比较，使实验结果能广泛用于不同油水配比，不同黏度及不同尺度的分离器设计中<sup>[3, 5]</sup>。本研究主要介绍应用上述关键部件试验和数值模拟研究结果设计的分离器样机以及样机在实验室运行和一些试验结果。

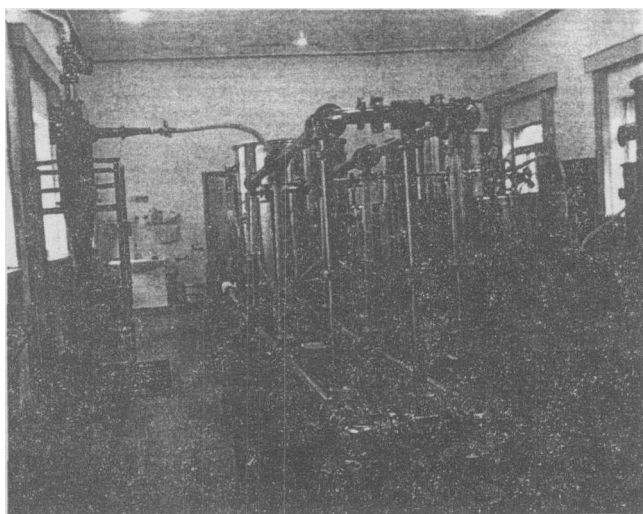


图 2 实验系统

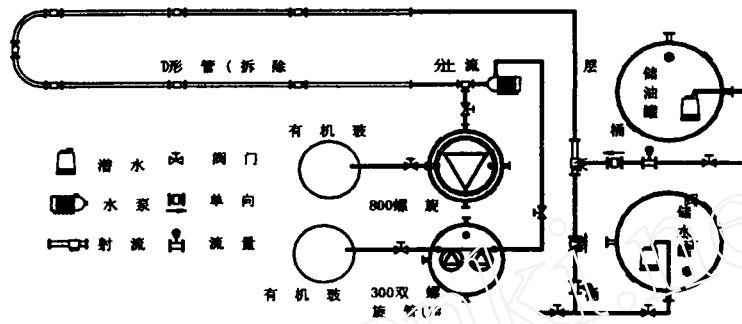


图3 螺旋管分离实验系统

## 2 关键部件研究结果

### 2.1 螺旋管实验

离心分离的关键部件是螺旋管，由图3可知，油水分离是由  $\rho_w/\rho_o$ ,  $u^2/Rg$ , 两个无量纲量支配，对于稠油  $\rho_w/\rho_o \approx 1$ ，所以离心分离主要取决于  $u^2/Rg$  的大小，早期实验采用三种规格的螺旋管，尺寸如表1所示，实验系统及实验布置如图3、图4所示。

表1 螺旋管的尺寸参数

螺旋管	回旋半径 $R$ (mm)	管直径 $D$ (mm)	螺距 $T$ (mm)	螺旋圈数	总高度 $H$ (mm)
1	400	40	100	6	600
2	150	25	100	6	600
3	150	25	60	12	720

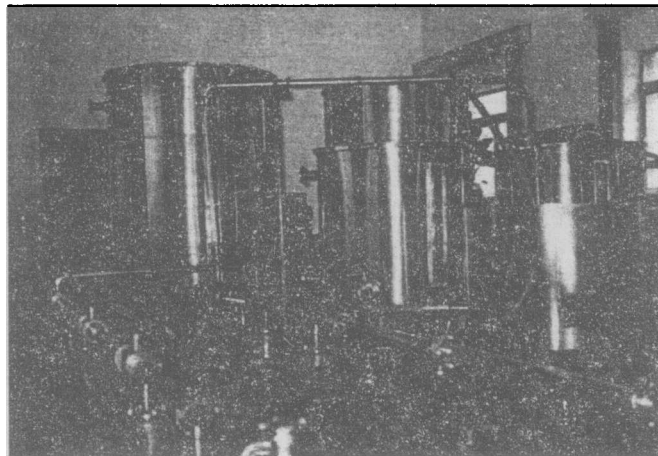


图4 螺旋管实验布置图

实验后发现,大回转半径  $R$  使离心加速度减小,在相同处理量条件下,过分提高速度使流体流经螺旋管的压降大大增加,为此,改进实验采用了小回转半径 ( $R=150\text{mm}$ ),稍大的螺旋管直径 ( $D=30\text{mm}$ ) 和缩小螺距 ( $T=60\text{mm}$ ) 方案,以期在相同螺旋管高度的情况下,增加圈数,减少流速。

此外,螺旋管侧壁开孔的大小及数量也是影响油水分离的重要因素,早期实验采用螺旋管出口处的最后三圈,开相同直径相同数量的小孔,经实验后发现,孔径和孔的数量采用每圈递减的形式,亦即它们应与螺旋管内油中含水量减少相匹配这样分离效果会更好。在我们的实验中  $u^2/Rg$  其值在  $1\sim 10$  之间变化,此时重力对管内的流体影响还不能忽略,从螺旋管数值模拟得到管截面上油水组份的分布中看到,最大含水率的位置应在右下侧,所以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。

在螺旋管离心分离中,黏性的影响主要通过降低流速减少离心作用来体现,因此对于特稠油的分离应增加流体进入螺旋管时的动力。

## 2.2 T型管实验

T型管也叫梯形管,由二根水平管与  $n$  根垂直管组成,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,实验系统及实验布置见图 5 和图 6, T型管中的流动是复杂的多相叉管流动,主管的流量每经一根垂直管就分流一次,起到膨胀及水平管中流动的减速作用。这对气液和液液分离都是有效的。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。通过大量不同黏度油品实验,我们认为适当增加  $h/d$  的值,如  $h/d\approx 20$ ,在不同黏度下分离效果更好,配以特殊设计的分流器,在稠油的情况下,通过 T型管的预分在顶管出口处,我们能获得少量  $1\%$  含水率的油,图 7 给出 T型管出口油取样及部分 T型管中流态照片 [4]。

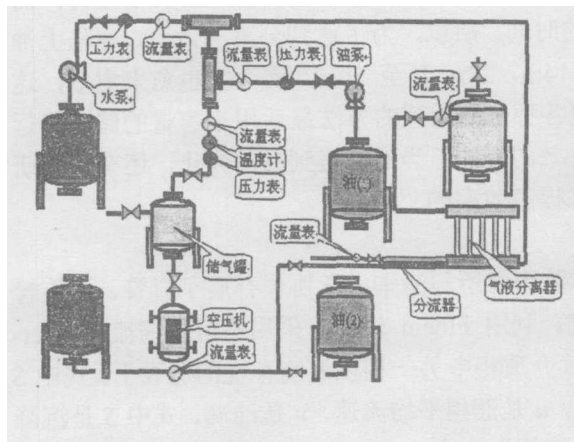


图 5 实验系统示意图

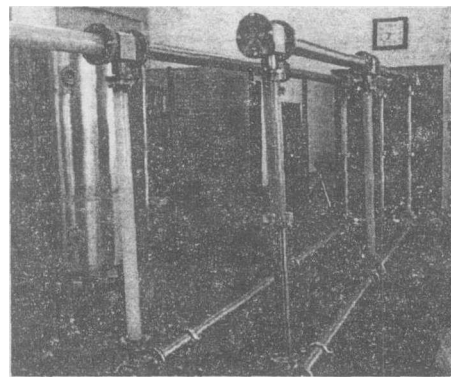


图 6 T形管分离器

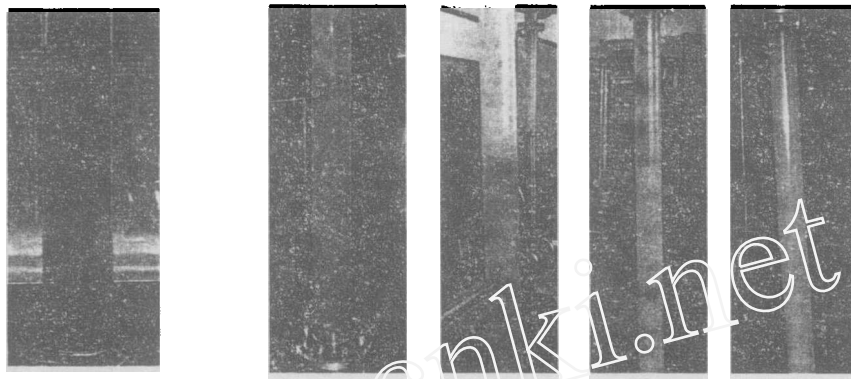


图7 T形管出口取样及部分T形管流态

### 2.3 重力沉降试验

工业上用密闭的圆柱形筒作重力沉降罐，我们用实验和数值模拟相结合的方法研究重力沉降的机理。从图3中可知，衡量分离效率是无量纲时间 $\bar{T}$ ：

$$\bar{T} = \frac{Au}{Sv}$$

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。我们把一定配比的油水充分混合后注入容器，观察它的分层时间，通过与数值模拟比较，首先证明了在一种连续相介质中另一分散相以液滴或气泡形式存在的假设是符合实验情况的。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，对于小于 $0.1\text{mm}$ 的直径或对于大于 $500\text{mPa}\cdot\text{s}$ 黏度的液体，重力沉降的速度就很慢，例如对于 $10\text{mPa}\cdot\text{s}$ 黏度的油，油水分离只需几十分钟，而对 $500\text{mPa}\cdot\text{s}$ 的油，油水分离就需1天多的时间。所以，为了达到分离的效率，在陆上油田的分离站中，容器的直径越造越大， $D=14\text{m}$ ， $22\text{m}$ 甚至 $50\text{m}$ ，而个数也愈来愈多，这在海上油田是不希望的。因此只有配以其他各种分离原理的方法最后用小容量的储罐进行最后的重力沉降处理，才是目前来说比较高效的方法。当然，直到目前为止，还有不少研究是在重力沉降罐中采用另外的辅助措施以提高效率的<sup>[7]</sup>。

### 2.4 数值模拟

配合上述关键部件实验研究，中国科学院力学所与清华大学协作开展了直管、螺旋管和容器中重力沉降的油水分分离数值模拟研究。利用Fluent软件，采用不可压缩流Navier-Stokes方程和两相流动的Euler模型，在连续介质相中另一相以液滴存在的假设下，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、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、文献[5]对直管和单圈螺旋管进行了数值模拟(限于文章篇幅，本文不列出其方程边界条件，只介绍有指导意义的重要结果)。在直管中，随着管长的增加，油水分离的效果逐渐明显。当管长与管径之比 $L/d \geq 200$ 时，油水有明显分层，随着黏度的增加，流速的降低，直管分离效果更好。在单圈螺旋管的组份图中，看到了离心力使油水分离的现象。当然，单圈的效果是微弱的，而

且在大回转半径条件下效果不明显。文献 [6] 改进计算推广到  $n$  圈, 从组份分布图中看到分离的效果逐圈提高。设计中小回转半径、低速度, 减少螺距, 增加圈数的设计方案, 是以此为基础的。为更好的模拟真实情况, 文献 [6] 中还计及小孔流出的螺旋管计算, 尽管流出量是根据实验结果拟合的, 但计算结果在孔数太多的情况下, 流出混合液中含油量大大增加的结果, 奠定了合理选择小孔位置及每圈孔数的设计思想。文献 [8] 对容器中重力沉降进行了数值模拟, 太小液滴直径及太大油黏度下, 油水分离的时间大大加长的结果是符合实验结果的, 文献 [8] 还发展了不同大小液滴直径共存条件下的油、水分离现象的数值模拟, 这些计算结果对推出复合分离原理综合使用的重要性以及合理使用重力沉降原理有着极其重要的意义。

### 3 样机设计及制作

从关键部件实验取得的结果分析, 我们认为采用集多种分离原理于一体的复合式分离器的设想是可行的。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, 图 8 给出了结构示意图。样机总长 4.5m, 宽 2.2m, 高 2.5m, 全部由不锈钢制成。为便于运输及实验室安装, 样机由八个部分拼装而成, 结构设计保证其强度及密封。实验时为观察螺旋管油水分离现象, 在分离器侧壁及顶盖处设置了有机玻璃观察窗及照明装置。箱体四周由上、下两根水平管 (周长约 15m) 和  $n$  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 (目前使用垂直管 8 根), 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。箱体分成密闭的二部分, 每一部分中最多可放四个螺旋管, 以适应大处理量油水分离情况, 改进后螺旋管尺寸见表 2。在具体实验时还可进行通过螺旋数量选择以获得最佳分离效果, 最少能耗及最简单控制的运行工况试验。在每一密闭箱中又分成大小二部分, 小箱体有上下出口, 目的是在箱体中使混合液通过重力沉降和溢流作用, 确保从小箱体上、下出口处引出的是符合指标要求的油和水。

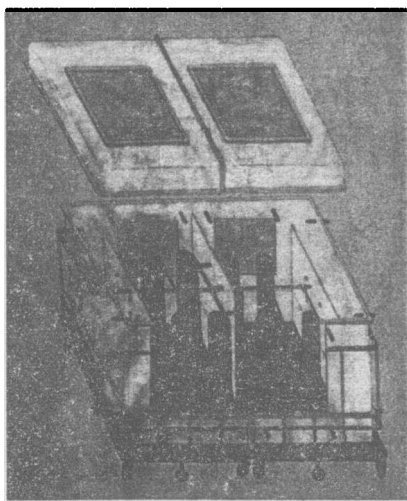


图 8 复合分离器样机结构示意图

表 2 新螺旋管的尺寸参数

螺旋管	回旋半径 $R$ (mm)	管直径 $D$ (mm)	螺距 $T$ (mm)	螺旋圈数	总高度 $H$ (mm)
1	400	32	60	16	932
2	150	25	60	16	925

为避免整个复合式分离器压降损失过大,各螺旋管与进液主管之间采用并联。为使样机制作简单及制造费用降低,又保证分离器内管流态及流动条件相似,我们仅保证了管流中的压比和流量比相同,而压力的绝对值与油田现场不同,也不在分离器上采用加热及保温措施。将来在进行工业现场样机设计时,通过强度设计以保证工业现场使用,同时在外壳设计时加保温层。

2005年3月中旬,样机制造完毕,图9为复合式分离器及螺旋管在厂中进行水压及水密性试验的照片。

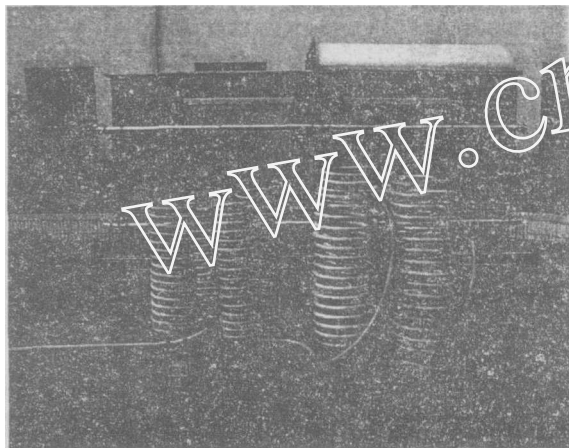


图9 水压及水密性试验



图10 实验室内水密性试验

#### 4 样机实验室运行

2005年3月底,样机运抵中国科学院力学所在实验室内安装完毕,图10是样机在实验室安装并进行完水密性试验后的照片。按两年前提出的实验室样机试验的设想(见图11),安装了油气循环系统。

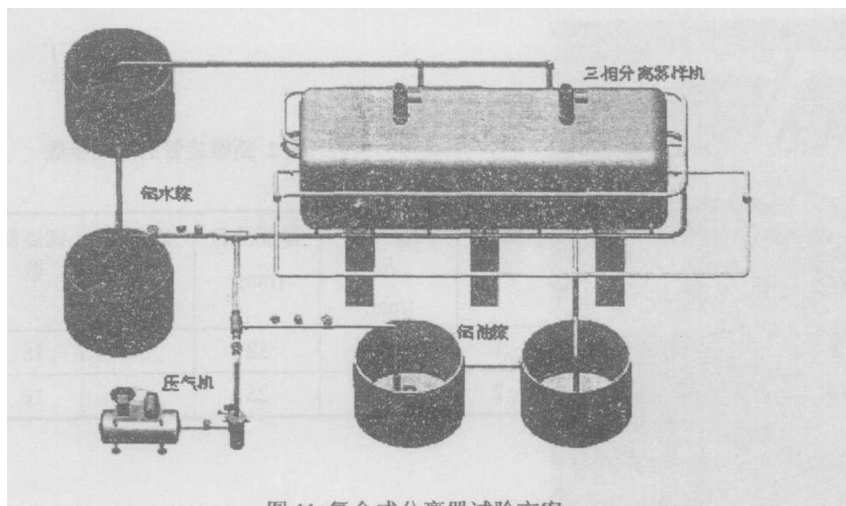


图11 复合式分离器试验方案

分离器样机试验运行原理是：油和水由油泵和水泵增压后经引射器按要求的油水配比混合(亦可再经引射器与压缩气体混合形成油气水三相流动)，混合好的油水混合物，通过T型管进行预分，在下水平管中由于油滴不断上浮，含水率将增大，流速降低，在上水平管中含油率将增大，因此在下箱体进口处进入(I)组螺旋管分离出水多油少的混合液，而在上箱体进口处进入另一箱体的(II)组螺旋管，将分离出油多水少的混合液，然后在各自的隔箱中再经过重力沉降和溢流，在上、下出口处流出的是符合指标的油和水。最后经过泵和循环系统，油水各自回到储罐中去，维持试验连续运行。图 12 是样机循环系统安装完毕试运行时的照片。

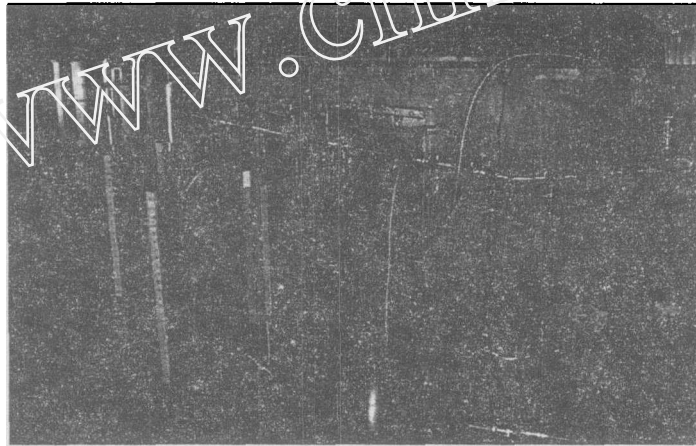


图 12 样机试运行

图 13 和图 14 是(I)( II)二组螺旋管在进行试验时从观察窗外拍摄到的照片。

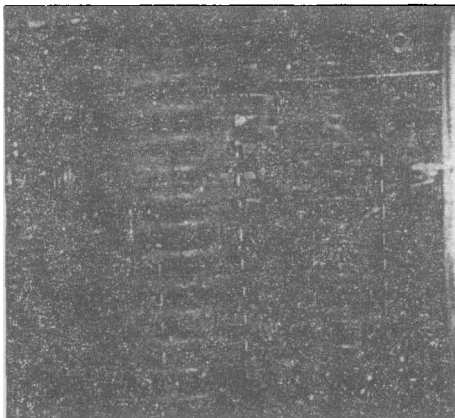


图 13 I 组螺旋管工况

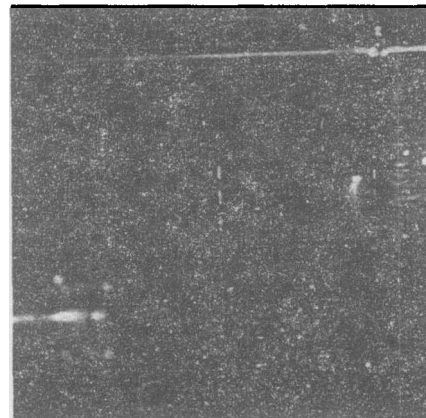


图 14 II 组螺旋管工况

目前，主管道内根据设置的油泵和水泵，对于不同黏度的油品(黏度为  $1\sim 1500\text{mPa}\cdot\text{s}$ )混合液的流速变化范围为  $0.2\sim 1.5\text{m/s}$ ，最大的日处理量为  $250\text{m}^3/\text{d}$ ，达到了按 1/10 流量缩尺设计的要求，根据实验室储罐及储油量，目前可维持 1h 的连续运行试验。应当指出的是经 T 型管与分流器组合而未经箱体沉降已经得到了少量含水率小于 1% 的油，它的意



义是在于利用复合原理的分离方法,既能达到高黏度分离效果,还能减轻分离器的重量即在相同体积的分离器条件下能增加日处理量,这一点在陆上油田尤其对海上油田的采收都极具重要意义。在2005年4月,工业成像国际会议接待外宾参观上述这个目前国际上尚无类似结构的复合式分离器,受到了国际石油公司、大学及研究机构的关注。图15是参观时的现场照片,目前该样机正进行油黏度为 $100\text{ mPa}\cdot\text{s}$ 左右与水不同配比下的分离试验,结果很好,下一步将加大油品黏度直至 $1500\text{ mPa}\cdot\text{s}$ ,同时还将进行最大日处理量的试验以考核样机的最佳性能。

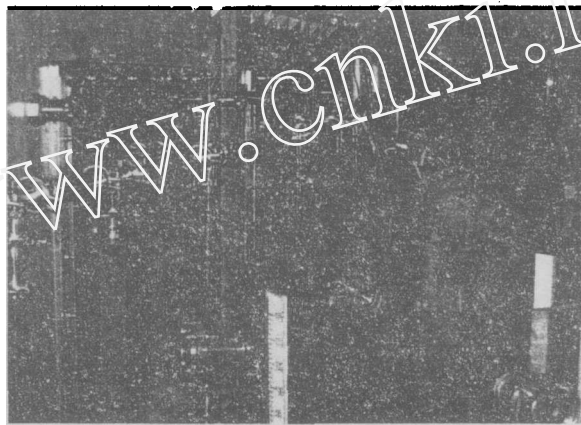


图15 国外专家参观样机试验

## 参 考 文 献

- 1 郑之初,周永,郭军,等.海上油气混输中的分离技术.见:第十七届水动力学研讨会论文暨第六届全国水动力学学术会议.北京:海洋出版社,2003,830-837.
- 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 郑之初,郭军,张军等.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 张军,郑之初,吴应湘,等.高效油气水分离器.见:2004年度海洋工程学术会议论文集.45(增刊):254-261.
- 5 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.
- 6 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,(审稿通过,待发表)
- 7 Lars schliepes, Michael chatterjee, Martin Henschke, & Andreas Pfennig, 《Liquid-liquid phase Separation in gravity settler with inclined plates》,AIChE Journal, 2004,150(4):802-811.
- 8 龚道童,吴应湘,郑之初,等.重力沉降分离的数值计算.见:第七届全国水动力学学术会议暨第十九届水动力学研讨会文集.北京:海洋出版社.

## Progress report 2 of the combined oil-gas-water separator

### —Separator prototype test

Zheng Zhi-chu Zhang Jun Guo Jun Gong Dao-tong Tang Chi  
( Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100080)

**Abstract:** A combined oil-gas-water separator scheme based on theories of gravity, expansion and centrifugation was proposed by Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, for studying the high-efficiency oil-gas-water separation which is concerned in the processes of oil-gas production, transportation and storage at onshore and offshore oil fields. Separation with spiral and T-shape pipes is an important method of centrifugation and expansion separation. The performance experiments and numerical simulation calculations of spiral and T-shape pipes were carried using the oil-gas-water separation simulation experimental apparatus which was built at Institute of Mechanics in 2004 under various conditions of different oil samples, oil-water mixture ratios and flowrates, and some important design rules were obtained, for example, the spiral pipes should use small gyration radius and multi-circles; for large flowrate separation where multiple spiral pipes are utilized, the pressure loss will be greatly reduced when parallel mode is used instead of cascade mode; by controlling the heights, inner diameters and amount of vertical pipes when designing T-shape pipes, the double-separation effect of expansion and gravity can be achieved. By combining the T-shape pipe, spiral pipe and other separation components, the separation results with water content less than 1% in oil were obtained under the conditions of different oil samples and oil-water ratios, which achieved the international top level and was a breakthrough development.

Up to now, based on above works, a new combined oil-gas-water separator prototype was designed according to 1/10 of the handling capacity of industrial separators, with a size of  $4.5 \times 2.2 \times 2.5$  meter and was fabricated with stainless steel. The prototype was installed in the separation laboratory of Institute of Mechanics at the end of March, 2005 and some tests have been implemented. The separator is about 15% lighter than the most advanced domestic oil-gas-water separator with a same handling capacity, and this can be improved further. Based on these results, the full-scale combined oil-gas-water separator will be designed and its performance will be tested at onshore oil field in the latter half of 2005.

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