

# 新型管式油水分离系统

郭军, 王立洋, 张军, 唐驰, 郑之初

(中国科学院力学研究所, 北京, 100190)

**摘要:** 本研究结合海上平台的特点, 提出了一种新型油水分离系统, 主要由柱形液液旋流器、带孔套管和 T 型多分岔管路等几部分组成。与目前大量使用的油水分离设备相比, 这种新型管式分离系统具有体积紧凑、结构简单、分离效率高、运行工况范围宽等优点, 水中含油率可以得到有效的控制, 尤其适合于海上平台的无污排放处理。本研究结合欧拉多相流模型和雷诺应力湍流模式对各个主要部件开展了大量的数值模拟, 计算中考察了入口流速、相含率和流量对比对油水相分离的影响。根据计算结果, 目前已完成了整套装置的设计和加工, 将进行系统的室内实验研究, 观察管路内的两相流型和相分布情况, 并测量压力、流量配比和油中含水率等实验数据。近期这套系统将在南海陆丰 13-1 平台的现场试验中进行考验。

**关键词:** 多相分离; 石油开采; 数值模拟; 现场试验

## 1 前言

石油开采过程中, 产出液内经常含有大量的游离水。以 2007 年为例, 我国的原油产量为 1.87 亿 t, 产水量约为 1.40 亿 t。大量游离水的存在不仅增大了能耗和燃料消耗, 还会引起金属管路和设备的结垢和腐蚀, 并影响到炼厂的正常处理。因此, 必须通过有效的工艺处理手段进行油水分离作业。经过分离后, 油水混合物分为外输原油和含油污水两块, 其中外输原油中的含水率通常低于 0.5%, 而含油污水的含油率一般在  $100 \times 10^{-6} \sim 1\,000 \times 10^{-6}$  范围内变化, 部分稠油区块高达  $2\,000 \times 10^{-6}$  至  $10\,000 \times 10^{-6}$ 。

含油污水的处理方式包括外排和回注两种。对于前者, 若污水中的含油率过高, 进入土壤后将在土壤微小孔隙间形成油膜而产生堵塞作用, 破坏土层的结构, 因此外排污水的含油率指标规定在  $10.0 \times 10^{-6} \sim 20.0 \times 10^{-6}$  范围内。与外排方式相比, 将含油污水通过预处理和深度净化后回注至岩层, 不仅有利于环境保护, 而且对提高注水采收率十分有利<sup>[1]</sup>。但是, 我国油田中相当一部分属于低渗透油田, 对水质的要求非常苛刻, 有些区块要求回注污水中的含油率不得超过  $6.0 \times 10^{-6}$ 。因此, 必须配置一套有效的污水处理系统, 使经过原油脱水后的含油污水达到外排或回注指标。

目前油田上一般是通过二级或三级处理来降低污水中的含油率, 对低渗透油层再加一级深度处理。图 1 为国外某海上平台使用的原油脱水加含油污水处理的工艺流程, 可以看出系统存在大型设备多、占地面积大、工程造价高、流程不密闭、系统压力利用不充分等诸多问题。此外, 随着开采年数的增加, 油田平均含水率将不断上升, 现有处理系统的负荷越来越

大，技术指标往往不能满足要求。因此，需要研发分离效率更高、处理量大、结构紧凑的油水分离器，使油水混合物经过处理后即可达到甚至超过原先需要两级或三级处理才能实现的指标。

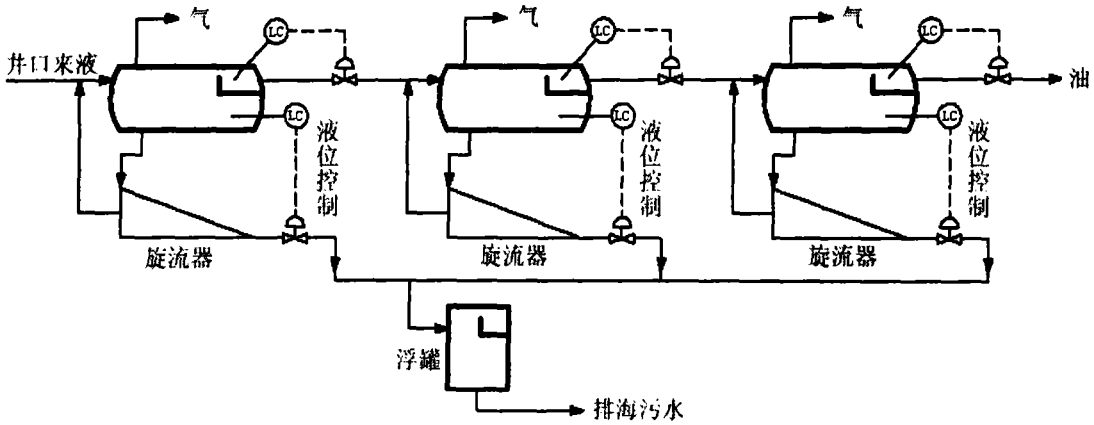


图1 海上平台采用的油水分离系统

## 2 课题背景

陆丰油田群位于中国南海区域，主要包括 LF13-1 油田、LF13-2 油田和 LF22-1 边际油田等，其中 LF13-1 油田于 1993 年 10 月 8 日正式投产，初期产量达到  $2862 \text{ m}^3/\text{d}$ ，近期全部 27 口采油井日产原油稳定在  $1876 \text{ m}^3/\text{d}$  附近。

图 2 为 LF13-1 平台现有油气水处理系统的示意图。

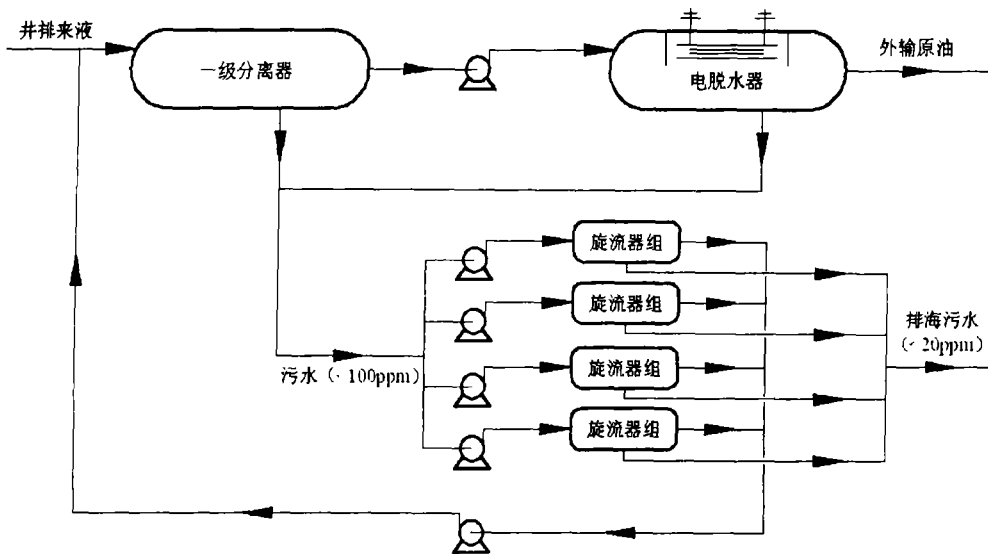


图2 陆丰 13-1 平台现有的处理系统

可以看出系统主要包括一级分离器、电脱水器和四台旋流器组，产出液经过处理后排海污水中的含油率可降至  $20 \times 10^{-6}$  左右。近年来随着对节能减排问题的日益重视，环保部门要求排海污水的含油率指标降至  $16 \times 10^{-6}$  以下，以减轻对南海海洋生态环境的污染，因此迫切需要对平台上现有的油水处理设施进行改造。

### 3 系统方案及开展的研究

根据平台的实际情况，课题组采用了“柱形液液旋流器+T型多分岔管路”组成管式油水分离系统这样一种方案，在进行结构设计之前首先对其开展了系统的数值模拟和室内实验研究。

#### 3.1 T型多分岔管路

如图3所示，T型多分岔管路主要由水平管段和垂直管段组成，具有结构简单、体积紧凑、分离效率高、压降损失小等优点。当油水混合物进入后，利用在各个分岔接头处将发生流量和相的分配不均现象实现油水两相之间的高效分离。T型多分岔管路中的油水两相流动非常复杂，本研究采用欧拉多相流模型开展了数值模拟，计算中考虑了入口流速、相含率和流量对比对油水两相分离的影响，此处流量配比定义为上水平管路出口处的流量与入口流量的比值。根据平台的来液条件，确定入口流速为  $1.7 \text{ m/s}$ ，入口含油率为  $0.05$ ，计算得到的流量配比-水中含油率关系曲线如图4所示。可以看出，随着流量配比的增加，下水平管路出口处的水中含油率是在逐渐下降的。当流量配比为  $0.5$  时，水中含油率为  $1600 \times 10^{-6}$ ，而当流量配比增至  $0.9$  时可进一步降至  $50 \times 10^{-6}$  附近。

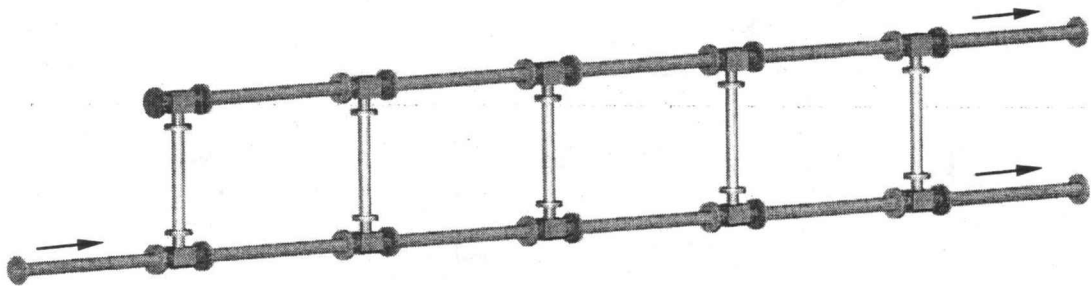


图3 T型多分岔管路示意图

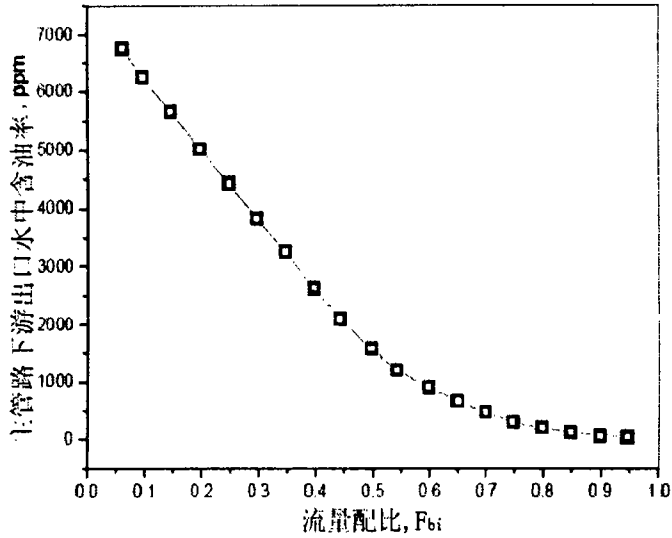


图4 流量配比 - 水中含油率曲线

### 3.2 柱形液液旋流器

在柱形分离器（图 5）的研究方面，目前国内外相关的文献比较有限，且绝大部分是针对气液两相分离和计量而展开的<sup>[2-4]</sup>。已有研究表明，柱形分离器的结构尺寸对分离效果有显著的影响。根据油田提出的处理液量要求，确定入口管路和柱体直径分别为 0.025m 和 0.05m，而  $H_1$  和  $H_2$  通过计算来确定。

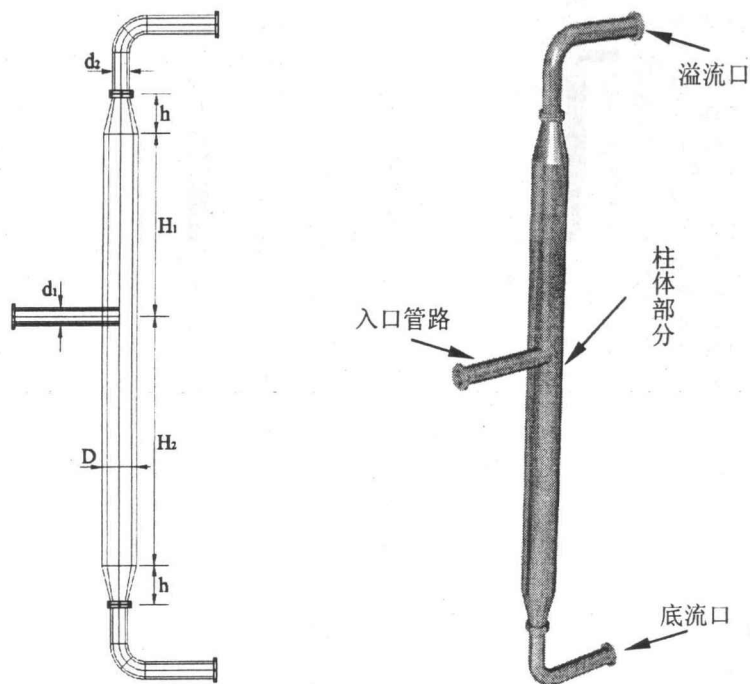


图5 柱形液液旋流器的示意图

在数值模拟中，柱体部分总高度分别为  $10D$ 、 $15D$ 、 $20D$  和  $25D$ ，对应  $H_1 = 2D$  和  $5D$  两种情况，共对八种不同结构的柱形旋流器进行了计算（表 1）。

表 1 计算采用的 LLCG 结构尺寸

	No.1a	No.1b	No.2a	No.2b	No.3a	No.3b	No.4a	No.4b
$\tilde{H}_1$	2	5	2	5	2	5	2	5
$\tilde{H}_2$	8	5	13	10	18	15	23	20

注： $\tilde{H}_1 = H_1 / D$ ， $\tilde{H}_2 = H_2 / D$ 。

图 6 给出了四种柱形旋流器内的截面含油率云图，此时溢流口处的质量流量占入口总量的 20.0%。可以看出，当油水混合物进入柱体管路后，在离心力场的作用下油相会迅速聚集成油核。大部分油相将从溢流口流出，水相从底流口排出，油水两相得到了很好的分离。当柱体总高度一定时， $H_1 = 2D$  情况下更多的油相将上旋至溢流口，相应地底流口的含油率也要低得多，因此适当上移入口管路位置可以起到改善油水分离效果的作用。

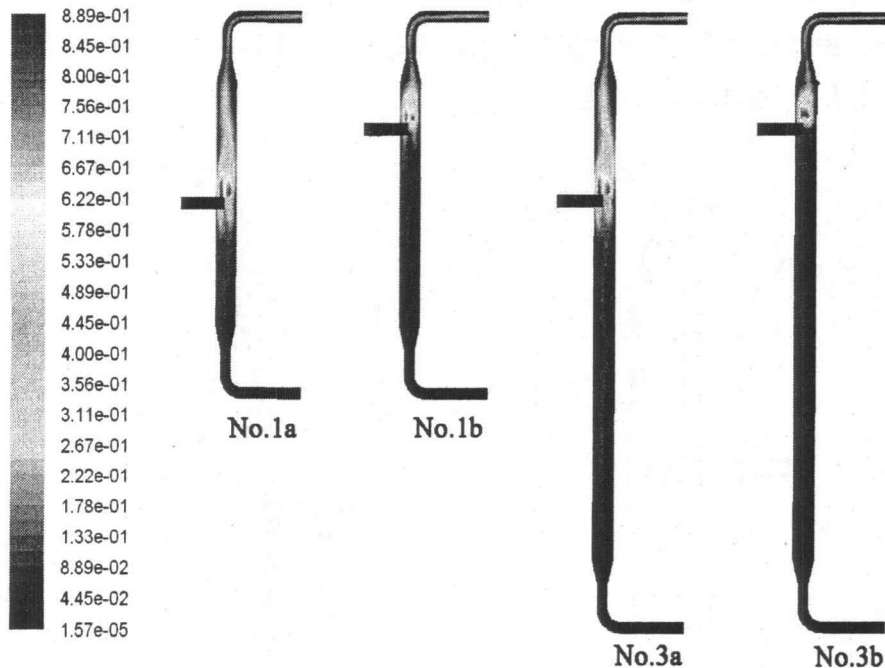


图 6 柱形旋流器截面含油率云图

### 3.3 带孔套管装置

计算发现，由于柱形旋流器内的强旋流场，在底部出口管路内液相仍以螺旋线形式沿管路流动。通常情况下，柱形旋流器底流口是低含油率的油水混合物，在离心力作用下这些油

相将浓集于底部出口管路的中心位置附近。根据这一流动特征，在柱形旋流器和 T 型多分岔管路之间可以增设一套带孔套管装置，它由两根同轴的管路组成，内管路壁面上开设有螺旋状分布的小孔，油水混合物在内管路流动的过程中，通过小孔将一部分水相引入内外管路之间的环形空间内，并从引流管流出。带孔套管装置可以起到两个作用：一是分离出其中的水相，二是在一定程度上改善 T 型多分岔管路内的油水分离过程（图 7）。

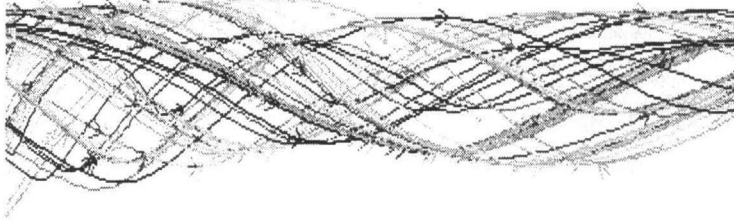


图 7 底部出口管路内的流线

#### 4 系统设计及下一步计划

根据上述研究结果，整个管式油水分离系统由三部分构成，即柱形旋流器、带孔套管装置和 T 型多分岔管路。目前，课题组已经完成了室内样机系统（图 8）的设计与加工，并正在着手开展系统的室内实验研究，实验中按照南海陆丰 13-1 的现场情况来设定入口来流条件和运行工况，并根据实验结果进一步优化该系统的结构尺寸。近期，将按照工业标准设计制造用于平台现场的分离系统，并在南海陆丰 13-1 平台的现场试验中进行考验。

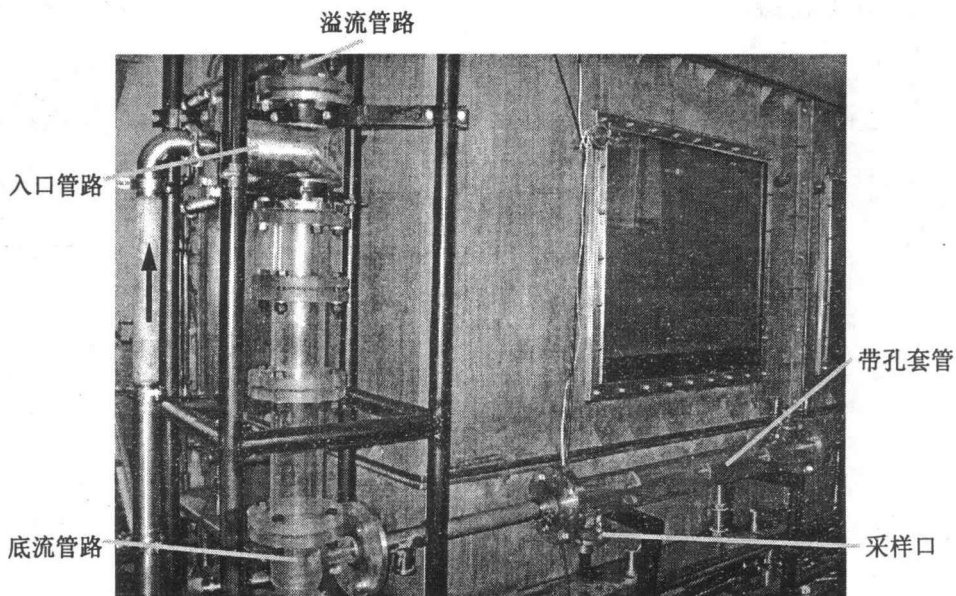


图 8 室内样机系统

## 5 结论

油水分离在油气集输工艺中起着非常关键的作用,新型管式分离系统是油水分离设备的

(1) 发展方向。本研究结合数值模拟和室内试验对此开展了研究,得到以下主要结论:T型多分岔管路利用油水两相在分岔接头处的流量和相分配不均现象实现高效分离,具有结构简单、体积紧凑、分离效率高、压降损失小等优点,但是须与其他分离装置配合使用才能满足平台的无污排放要求。

(2) 柱形旋流分离器的结构尺寸对分离效果有显著的影响,计算发现增加柱体高度或者适当上移入口管路位置可以改善油水分离效果。

(3) 模拟结果表明,柱形旋流器内为强旋流场,底部出口管路内液相以螺旋线形式沿管路流动,据此可在底部出口管路后增设带孔套管装置进一步完成油水两相之间的高效分离。

(4) 根据计算结果设计了新型管式分离系统的室内样机装置并正在进行系统的室内实验研究,近期将设计一套工业化装置并在南海陆丰 13-1 平台的现场试验中进行考验。

## 参 考 文 献

- 1 陈健,郑海军. 油田污水处理回注技术研究. 北方环境, 2004, 29(3): 19-23.
- 2 Kouba Gene E, Shoham, et al. Design and performance of gas-liquid cyclone separators. In: Proceedings of the BHR Group 7<sup>th</sup> International Meeting on Multiphase Flow. Cannes, France, June 7-9, 1995.307-327.
- 3 Arpandi I. Hydrodynamics of two-phase flow in gas-liquid cylindrical cyclone separators. SPE 30863, 1995.
- 4 Gomez L E. Enhanced mechanistic model and field application design of gas-liquid cylindrical cyclone separator. SPE 49174, 1998.