

DOI: 10.3969/j.issn1000-4874.2013.06.001

管道式油水分离系统分离特性研究*

陈颂阳¹, 魏从达¹, 吴奇霖¹, 许晶禹²

(1. 中国海洋石油总公司深圳分公司, 深圳 518067, Email: chensy@cnooc.com.cn;
2. 中国科学院力学研究所, 北京 100190)

摘要: 管道式油水分离系统由T型管路和柱型旋流器组成, 综合采用离心、膨胀和重力分离等原理, 是一种新型的分离装置, 具有分离效率高、占地面积小等优点。该文采用数值模拟和现场实验的方法对管道式分离系统的流场特征和分离性能进行了系统的研究, 分别考虑了入口流速、含油率和分流比等参数对分离系统的影响。数值模拟研究中, 采用欧拉-欧拉多相流模型和雷诺应力湍流模型, 结果显示设计的管道式油水分离系统可以有效的实现油水两相的快速分离, 对含油率为5%和25%的来液, 在总分流比约为50%时, 水中含油率可以分别降至0.025%和0.7%。现场实验采出液的温度为40°C, 体积含油率范围为6%-25%, 原油密度为902 kg/m³, 黏度为130 mPa·s。在现场实验流速为2.0 m/s-3.5 m/s的范围内, 生产液经设计的实验系统处理后, 水中含油率可低于600 mg/L。

关键词: 油水分离; T型管; 柱型旋流器; 流场特征; 分离性能

中图分类号: O359

文献标识码: A

Investigation on the separation performance for pipeline oil-water separation system

CHEN Song-yang¹, WEI Cong-da¹, WU Qi-lin¹, XU Jing-yu²

(1. Shenzhen Branch Company, China National Offshore Oil Corporation, Shenzhen 51806, China;
2. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: Pipeline oil-water separation system is a new-style equipment including series of T-junction pipes and cylindrical cyclones, which using the separation theory of gravity, centrifugation, expanding. The system is the high separation efficiency and small volume so as to improve the processing and decrease the area. In this paper, the flow field characteristic and separation performance of the system have been investigated in detail by using CFD and in-site experiments, which including the influences

* 收稿日期: 2013-08-23(2013-09-15 修改稿)

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项“水下油气水高效分离与计量装置”(2011YQ120048-02)

作者简介: 陈颂阳(1972-), 男, 广东省平原人, 学士, 工程师。

通信作者: 许晶禹, Email: xujingyu@imech.ac.cn

Received: August 23, 2013 (**Revised** September 15, 2013)

Project supported by foundation: Supported by the Subsea High Efficiency Oil/Gas/Water Separating and Metering Device for the Special Development of National Key Scientific Instruments in China (2011YQ120048-02)

Biography: CHEN Song-yang (1972-), Male, Bachelor, Engineer.

Corresponding author: XU Jing-yu, Email: xujingyu@imech.ac.cn

of inlet velocity, oil rate and the split ratio on the separation system. The Euler-Euler model and Reynolds-Stress model are used in the numerical simulation. In the field experiments, the temperature of fluid is 40°C, and the oil volume fraction of mixtures in the range of 6%-25%. The density of crude oil is 902 kg/m³ and zero shear viscosity is 130 mPas. It is shown that the system can achieve a rapid separation and the oil volume fraction of 5% and 25% in fluid can fall to 0.025% and 0.7% respectively, when the total separation ratio is about 50%. The results show that, using the pipeline separation system, the oil volume fraction can be decreased to below 600 mg/L in the velocity range of 2.0-3.5 m/s when the total separation ratio is below 40%.

Key words: oil-water separation; T-junction; cylindrical cyclone; flow field characteristics; separation performance

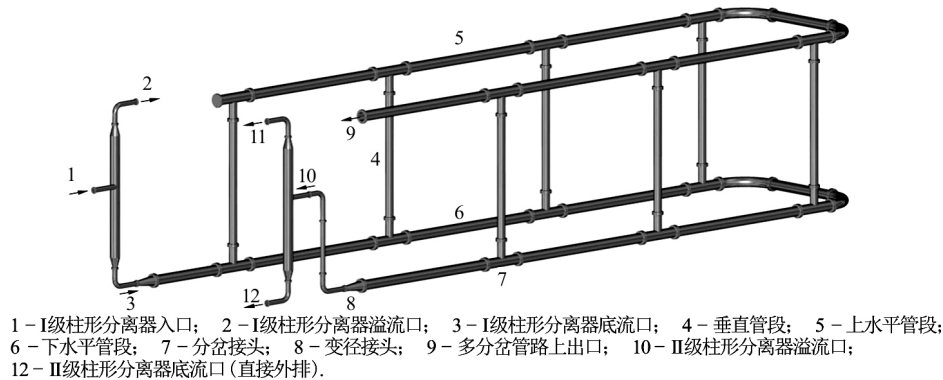


图 1 管道式油水分离系统示意图

Fig.1. Pipeline oil-water separation system

1 引言

目前,国内外大部分海上油田随着开采时间的增长,油田采出液中的含水率逐渐增加,部分油田的含水率已达到 90% 以上。因此需要快速、高效的分离设备,且为了达到环境排放要求和回注水质量要求,需要精细处理大量的含油污水,故发展高效的油气水分离技术和精细的含油污水处理技术已经成为当今油田工程技术发展的重要问题。近些年来,国内外学者围绕着油水分离技术开展了大量的理论和实验研究工作。其中,20 世纪八十年代提出的应用水力旋流器进行油水分离的方法得到了广泛的应用。但由于水力旋流器的入口形状和锥度结构等对处理量有着较严格的限制,若来液超出此范围将很难实现油水的完全分离,且有对于大处理量的要求,因此水力旋流器还需要具有较大的长度^[1]。为了克服这一问题,“十一·五”期间中国科学院力学研究所多相流课题组与中国海洋石油总公司深圳分公司在重大科技合作项目中,依据多年的多相流理论基础的研究,提出了一种由 T 型多分岔管路^[2-4]和柱型旋流分离器组成的高效管道式油水分离系统^[5]。该系统具有处理速度快、效率高和占地面积小等优势,符合目前石油工业对分离系统的要求,具有广阔的应用前景。在前期的工作中,已经针对整个系统的关键部件(T 型管道和旋流管道)进行了单独的研究工作。Yang 等^[6]、王立洋等^[7-9]和 Chen 等^[10]采用数值模拟和室内实验的方法对 T

型管道内的油水两相流动进行了详细的研究,结果显示 T 型管分岔处油水两相发生了明显的分离,且分离受入口流速、相含率等因素的影响,故可以在一定的工况下实现油水两相的精细分离。Oropeza 等^[11]、Mathiravedu 等^[12]和刘海飞等^[13-16]对柱型旋流器内的单相流流场进行了数值模拟和室内实验研究,并采用室内实验的方法对旋流器的分离性能进行了测试,研究表明柱型旋流器对单相来流可以形成一个有效的使油水实现分离的流场,且在室内实验中对油水两相来液在不同的工况下均可以实现较好的分离。

本文是在上述前期研究的基础上,针对整体系统进行数值模拟和现场试验验证工作,研究结果有望为开发新型的管道式油水分离系统提供理论和技术指导^[13,14],流程示意图如图 1 所示。

2 实验装置和过程

高效管道式油水分离系统,由第一级柱型旋流器、T 型管多分岔管路和第二级柱型旋流器串联组成,第一级柱型旋流器的下出口连接至 T 型管的入口,然后 T 型管的下分支出口连接至第二级柱型旋流器的入口,其连接流程如图 1 所示。两级采用的柱型旋流器结构及尺寸均相同,主体管道内径为 50 mm,入口管道内径为 50 mm,上出口管道内径为 25 mm,下出口管道内径为 32 mm,柱体高度为 1660 mm,入口距底边高度为 1000 mm。T 型管多分岔管路共有 7 根立管组成,管道内径均为 50 mm,

立管之间的间距为 1000 mm, 立管的长度均为 500 mm。同时, 上述的结构中均配有可以连续调节的阀门和流量计。

本文的实验工作是在胜利油田生产现场完成的。图 2 给出了高效管道式油水分离系统的安装示意图。首先从生产管线的预留分支管路中引出生产来液, 采用内径 80 mm 的 PVC 管道连接至现场安装的段塞消除装置, 其中在预留分支管路中安装有调节阀门, 可以根据实验需要进行连续调节; 然后经段塞消除装置处理后, 气体直接输至原有的天然气分离装置, 油水混合液进入设计加工的高效管道式油水分离系统; 最终将分离系统的三个出油口和一个出水口均连接至实验缓冲罐体, 并通过提升泵系统回输至生产的来液总干线, 完成现场实验循环。

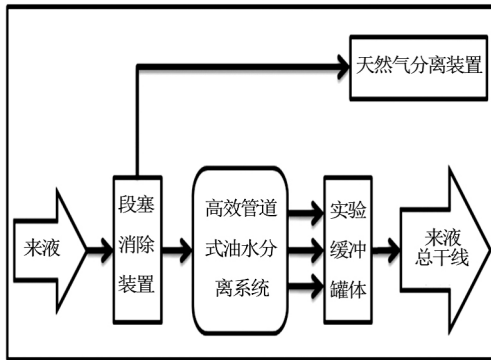


图 2 高效管道式油水分离系统安装示意图
Fig.2. Installation diagram of pipeline separation system

实验中, 现场的生产来液是由多口油井汇集而来, 混合液的温度为 40°C, 含油率在 6% - 25% 的范围内波动, 故每次取样中需要多次测量分离系统入口的含油率。原油的密度为 902 kg/m³, 黏度为 130 mPa·s, 水相的密度为 1000 kg/m³。实验过程中, 高效管道式分离系统的入口流速为 1.0 m/s - 3.5 m/s。

3 管道式油水分离系统的数值模拟研究

流场特征的研究方法主要分为直接测试和数值模拟两大类。直接测试方法包括激光测速、PIV 测流场以及层析成像等。但对于两相流动, 由于存在分散相颗粒, 故对示踪粒子类的方法存在较大的干扰, 会影响测试的精度, 同样对于其他的测试手段也存在测试精度不高的问题。随着多相流模型和湍流模型不断发展更新, 给数值模拟的精度提供了保障。因此, 通过数值模拟研究可以较好的了解

管道式分离系统内油水两相的流场特征和分离性能。王立洋等^[8]和刘海飞等^[9]分别针对 T 型管多分岔管路和柱型旋流器在各种不同工况下的流场特征进行了较系统的数值模拟。目前, 管道式分离系统由柱型旋流器和 T 型管串联组成, 各个分支管道之间存在着压力、流量和相含率等匹配现象。因此, 为了进一步了解管道式分离系统的流场特征和分离性能, 需对设计的工艺流程进行整体的研究。

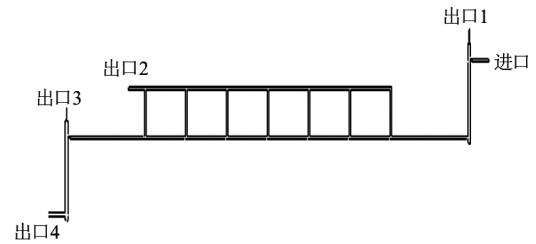


图 3 管道式分离系统物理模型
Fig.3. Physical model of pipeline oil-water separation system

3.1 基本方程

油水两相流动数值模拟的基本方程主要包括两部分: 两相流动的动力学方程与湍流模型方程^[11-13]。

相体积率代表了每一相所占据的空间。在多相流动中, 每一相的体积可由下式给出

$$V_q = \int_V \alpha_q dV \quad (1)$$

式中: q 代表多相流中的第 q 相; V_q 表示 q 相的体积; α_q 为 q 相的体积率, 且有

$$\sum_{q=1}^n \alpha_q = 1 \quad (2)$$

连续性方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \mathbf{u}_q) = 0 \quad (3)$$

动量方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q \rho_q \mathbf{u}_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \mathbf{u}_q \mathbf{u}_q) = \\ -\alpha_q \nabla p + \nabla \cdot \overline{\tau}_q + \alpha_q \rho_q \mathbf{g} + \sum_{p=1}^n K_{pq} (\mathbf{u}_p - \mathbf{u}_q) + \\ \alpha_q \rho_q (\mathbf{F}_q + \mathbf{F}_{\text{lit},q} + \mathbf{F}_{\text{vm},q}) \end{aligned} \quad (4)$$

其中, τ_q 是第 q 相的压力应变张量, 有

表 1 入口含油率为 5% 各截面体积含油率
Table 1. Oil volume fraction on sections

	进口	出口 1	出口 2	出口 3	出口 4
体积含油率	0.05	0.054617	0.36584	0.00395	0.00025

表 2 入口含油率为 5% 各截面处质量流量
Table 2. Mass flow rate on sections

	进口	出口 1	出口 2	出口 3	出口 4
流量 (kg/s)	49.832	1.615	12.972	8.707	26.532

$$\overline{\tau}_q = \alpha_q \mu_q (\nabla \mathbf{u}_q + \nabla \mathbf{u}_q^T) + \alpha_q \left(\lambda_q - \frac{2}{3} \mu_q \right) \nabla \cdot \mathbf{u}_q \mathbf{I} \quad (5)$$

式中： μ_q 和 λ_q 是第 q 相的剪切和体积黏度； F_q 、 $F_{\text{lift},q}$ 和 $F_{\text{vm},q}$ 分别是外部体积力、升力和附加质量力。

雷诺应力湍流模型为：

$$\frac{\partial}{\partial t} (\overline{\rho u'_i u'_j}) + \frac{\partial}{\partial x_k} (\overline{\rho u'_k u'_i u'_j}) = P_{ij} + D_{Tij} + \phi_{ij} - \varepsilon_{ij} + F_{ij} \quad (6)$$

$$P_{ij} = -\rho \left(\overline{u'_i u'_k} \frac{\partial u'_j}{\partial x_k} + \overline{u'_j u'_k} \frac{\partial u'_i}{\partial x_k} \right) \quad (7)$$

$$D_{Tij} = -\frac{\partial}{\partial x_k} [\overline{\rho u'_i u'_j u'_k} + p(\delta_{kj} u'_i + \delta_{ik} u'_j)] \quad (8)$$

$$\phi_{ij} = \left(\overline{\frac{\partial u'_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u'_j}{\partial x_i}} \right) \quad (9)$$

$$\varepsilon_{ij} = -2\mu \frac{\partial u'_i}{\partial x_k} \frac{\partial u'_j}{\partial x_k} \quad (10)$$

$$F_{ij} = -2\rho \Omega_k (\overline{u'_j u'_m} \varepsilon_{ikm} + \overline{u'_i u'_m} \varepsilon_{jkm}) \quad (11)$$

其中： P_{ij} 为应力产生项； D_{Tij} 为湍流扩散项； ϕ_{ij} 为压力应变项； ε_{ij} 为黏性耗散项； F_{ij} 为系统旋转产生项。

3.2 数值模拟结果分析

3.2.1 入口含油率为 5% 的结果分析

数值模拟中，首先选择对低含油率工况进行了研究。设定入口水相流速为 1 m/s，油相速度为 1 m/s，含油率为 5%。表 1 给出了在管道式分离系统内的油水两相流动达到稳态后，图 3 中标注的各

个出口处的体积含油率，表 2 对应给出了各个出口的质量流量。从表中可以看出：第一级柱型旋流器上出口分流比约为 0.032，对应的含油率为 0.054617，高于入口含油率，即表明经过第一级柱型旋流器处理后，可以初步降低水中含油率，然后进入下一级 T 型管路进行处理；T 型管上出口的分流比约为 0.28，对应的体积含油率为 0.36584，即 T 型管有效的降低了水中含油率，使进入第二级柱型旋流器的混合液含油率约为 0.001；最终，经过第二级柱型旋流器处理后，水中体积含油率为 0.00025。图 4 给出了管道式油水分离系统各个部分的油水分布图。从图中可以清晰的看出，随着油水混合液在分离系统中的流动，油水两相逐渐的进行分离，并最终将水中含油率降至 0.00025。

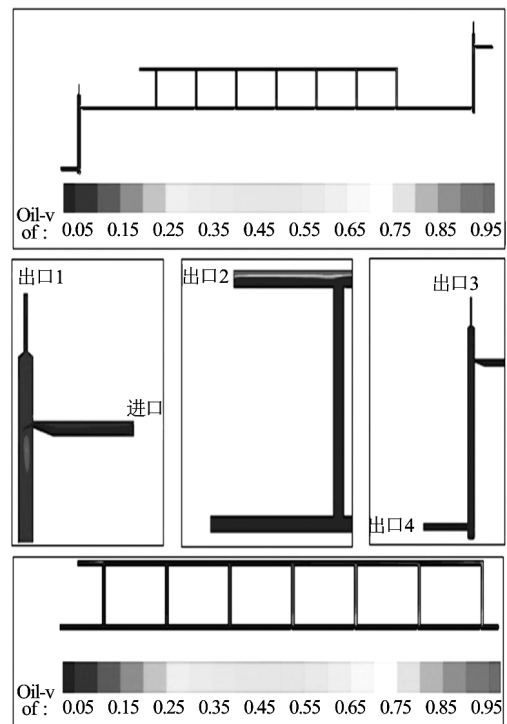


图 4 入口含油率为 5% 分离系统含油率分布
Fig.4. The distribution of oil volume fraction in pipeline separator

表 3 入口含油率为 25% 各截面体积含油率
Table 3. Oil volume fraction on sections

	进口	出口 1	出口 2	出口 3	出口 4
体积含油率	0.25	0.324	0.885	0.041	0.007

表 4 入口含油率为 25% 各截面处质量流量
Table 4. Mass flow rate on sections

	进口	出口 1	出口 2	出口 3	出口 4
流量 (kg/s)	49.158	4.850	11.534	7.792	24.981

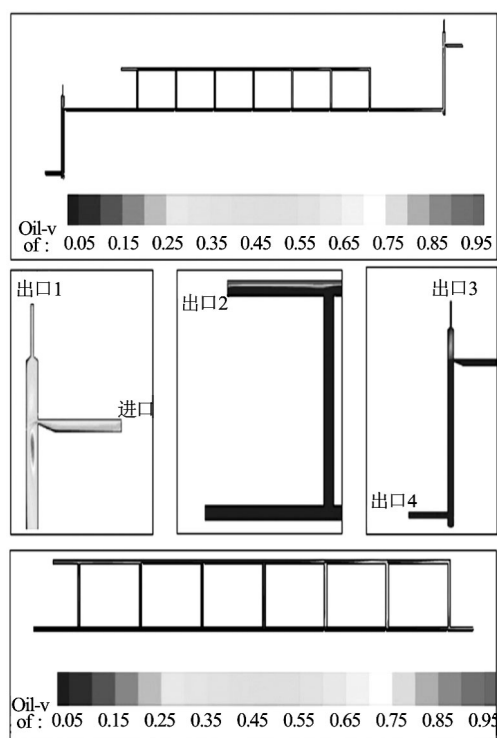


图 5 入口含油率为 25% 分离系统含油率分布
Fig.5. The distribution of oil volume fraction in pipeline separator

3.2.2 入口含油率为 25% 的结果分析

对于高含油混合液, 设定入口含油率为 25%, 水相流速为 1 m/s, 油相速度为 1 m/s 工况下的数值模拟。表 3 给出了在管道式分离系统内的油水两相流动达到稳态后, 图 3 中标注的各个出口处的体积含油率, 表 4 对应给出了各个出口的质量流量。从表中可以看出: 由于来液含油率较高, 第一级柱型旋流器上出口分流比增至为 0.1, 此时对应上出口 (出口 1) 的含油率为 0.324, 即此时下出口水中含油率降至 0.24, 同时将油相进行聚并, 有利于下一步的分离处理, 然后进入 T 型管路; T 型管上出口的分流比约为 0.272, 对应的体积含油率为 0.885, 此时 T 型管下出口含油率约为 0.015; 最终, 经过

第二级柱型旋流器处理后, 水中体积含油率为 0.007。图 5 给出了管道式油水分离系统各个部分的油水分布图。从图中可以清晰的看出, 随着油水混合液在分离系统中的流动, 油水两相逐渐的进行分离, 且在总分流比 (出口 4 相对进口的分流比) 为 0.5 时, 将水中含油率降至 0.007。

4 高效管道式油水分离系统现场实验结果分析

现场实验中, 对设计加工的由第一级柱型旋流器、T 型管道式分离器和第二级柱型旋流器串联构成的高效管道式分离系统进行了系统的研究。实验过程为: (1) 调节总来液入口和管道式分离系统入口处的阀门, 将高效管道式分离系统的入口流速固定在预定的值; (2) 调节第一级柱型旋流器上出口和下出口、T 型管两个出口与第二级柱型旋流器上出口和下出口处的阀门, 并将其对应管路的流量固定在预设值, 即固定三个分离部件的分流比 (分流比定义为各分离部件下出口的流量与入口流量的比值, 如式 (11) 所示); (3) 保持各个阀门处于稳定状态, 连续运行 60 分钟, 然后分别在管道式分离系统的入口、第一级柱型旋流器的上出口和下出口、T 型管的上出口和下出口以及第二级柱型旋流器的上出口和下出口进行取样, 测试其对应的含油率值; (4) 调节各个分离部件的阀门, 变换不同的分流比以及来液的流量, 进行上述同样的实验测试。

$$S = Q_{out} / Q_{inlet} \quad (12)$$

表 5 给出了实验过程中记录分离系统的各个运行参数值。从表中结果可以看出, 序号 1 和序号 2 记录的实验为段塞消除装置没有工作的工况, 即总干线来液直接进入管道式分离系统, 最终分离出约 40% 的水相, 但水中含油率高于 1%, 这主要是由于

表 5 高效管道式分离系统实验数据 (流量: m^3/h)
Table 5. Experimental data in field of pipeline oil-water separation system

序号	生产管道来液		段塞消除装置出口流量	第一级柱型旋流器		第二级柱型旋流器	
	流量	含油率 (%)		上出口流量	下出口含油率 (%)	上出口流量	下出口含油率
1	8	22%	0	2.37	14.30%	3.21	1.20%
2	10	13.60%	0	4.19	7.25%	3.92	1.47%
3	11.58	15.50%	1.079	1.3	4.80%	4.15	0.54%
4	18.67	17.81%	1.618	0.747	--	4.247	508 ppm
5	20.5	21.40%	0.99	0	--	6.85	539 ppm

气体进入柱形旋流分离器, 扰乱了其内部的流场特征, 进而影响分离性能。序号 3、序号 4 和序号 5 为消除段塞后的分离结果, 即来液为排除气体后的油水混合物。序号 3 给出了入口流量为 $11.58 \text{ m}^3/\text{h}$, 含油率为 15.50% 工况下管道式分离系统的分离性能, 可以看出经过快速处理后, 水中含油率已降至 0.54%。图 6 给出了序号 3 对应的各个出口的混合液取样情况。由图中可以看出, 流经每一级分离装置, 水中含油率呈逐渐降低趋势, 并最终达到污水处理等下一级处理系统要求的指标。表 5 中序号 4 和序号 5 实验给出了具有较好的水处理结果的运行工况和操作参数, 其处理之后的水中含油率均低于 600 mg/L 。

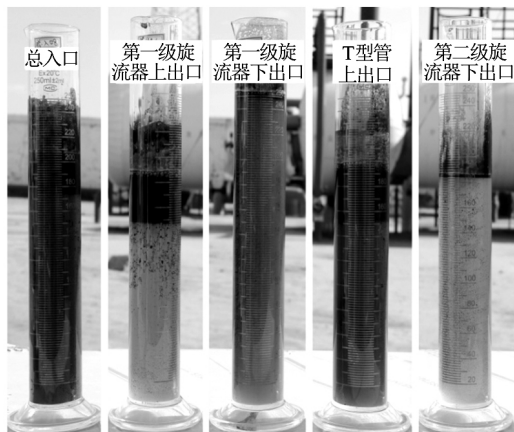


图 6 序号 3 实验运行工况取样结果
Fig.6. Sampling results of every pipes under the condition of NO.3

5 结论

管道式油水分离系统是由第一柱型旋流器、T型管道式分离器和第二柱型旋流器串联组成的高效分离装置, 其具有处理速度快、处理指标高、占

用空间小等优点, 特别适用于对高含水率采出液进行初步处理, 缓解后续油田生产设备的处理压力, 而且能够节约海上采油平台有限的空间和承载重量。本文在前期理论和室内实验研究的基础上, 首先开展了对管道式分离系统内复杂流场的研究, 给出了入口含油率分别为 5% 和 25% 两种工况下, 分离系统中各个分支的含油率分布情况, 然后设计加工了一套管道式油水分离系统, 并在石油工业生产现场进行了实验研究, 为进一步的现场应用及推广提供相关依据。通过分析实验中测试的数据得出以下主要结论:

(1) 数值模拟中, 对入口含油率分别为 5% 和 25% 的工况进行了研究, 总分流比约为 0.5 时, 可分离出混合液中 50% 的液体, 且可以使分离出混合液的含油率分别达到 0.025% 和 0.7%, 达到了较好的分离效果。

(2) 在现场实验中, 管道式分离系统可以快速的对来液进行分离, 能够分离出混合液中 40% 以上的水相, 且水中含油率可以低于 600 mg/L 。由此表明该分离系统适用于高含水油井的初步分离, 减小后续设备的处理压力。

参 考 文 献:

- [1] 耿高峰. 油水分离水力旋流器锥段长度对速度场影响研究[J]. 化学工程与装备, 2012, (2): 30-33.
GENG Gao-feng. Investigation on the effect of hydrocyclone cone length on the velocity field[J]. Chemical Engineering and Equipment, 2012, (2): 30-33.
- [2] AZZOPARDI B J, COLMAN D A, NICHOLSON D. Plant application of a T-junction as a partial phase separator[J]. Chemical Engineering and Design, 2002, 80(1): 87-96.

- [3] WREN E, AZZOPARDI B J. The phase separation capabilities of two T-junctions placed in series[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2004, 82(3): 364-371.
- [4] YANG L, AZZOPARDI B J. Phase split of liquid-liquid two-phase flow at a horizontal T-junction[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2007, 33(2): 207-216.
- [5] 邓晓辉, 吴应湘, 魏从达, 等. 复合式油水分离系统[P]. ZL1010146416.6, 中国, 2010.
DENG Xiao-hui, WU Ying-xiang, WEI Cong-da, et al. Compound oil-water separation system [P]. ZL1010146416.6, China, 2010.
- [6] YANG L, AZZOPARDI B J, Belghazi A. Phase separation of liquid-liquid two-phase flow at a T-junction[J]. AIChE Journal, 2006, 52(1): 141-149.
- [7] 魏从达, 许晶禹, 王立洋, 等. T型管内油水两相流动规律及其应用[J]. 油气储运, 2012, 31(12): 923-926.
WEI Cong-da, XU Jing-yu, WANG Li-yang, et al. Study of an oil-water two-phase flow through T-junction[J]. Oil and Gas Storage and Transportation, 2012, 31(12): 923-926.
- [8] 王立洋, 郭军, 张军, 等. T型管多分岔管路中的油水两相流动实验研究[C]. 第二十一届全国水力学研讨会, 济南, 中国, 2008, 582-588.
WANG Li-yang, GUO Jun, ZHANG Jun, et al. Experimental study on oil-water two-phase flow inside T-shaped pipes[C]. 21th National Conference of Hydrodynamics, Jinan, China, 2008, 582-588.
- [9] WANG Li-yang, WU Yi-xiang, ZHENG Zhi-chu, et al. Oil-water two-phase flow inside T-junction[J]. Journal of Hydrodynamics, 2008, 20(2): 147-153.
- [10] CHEN Jian-lei, HE Li-min, LUO Xiao-ming, et al. Simulation of oil-water two phase flow and separation behaviors in combined T-junctions[J]. Journal of Hydrodynamics, 2012, 24(6): 848-857.
- [11] OROPEZA-VAZQUEZ C, AFANDOR E, GOMEZ L, et al. Oil-water separation in a novel liquid-liquid cylindrical cyclone (LLCC) compact separator-experiments and modeling[J]. Journal of Fluids Engineering, 2004, 126(4): 553-564.
- [12] MATHIRAVEDU R S, WANG S B, MOHAN R S, et al. Performance and control of liquid-liquid cylindrical cyclone separators[J]. Journal of Energy Resources Technology, 2010, 132(1): 1-9.
- [13] 刘海飞, 邓晓辉, 罗东红, 等. 柱型旋流器内单相流场压降的实验研究[J]. 水力学研究与进展, A 辑, 2010, 25(6): 851-856.
LIU Hai-fei, DENG Xiao-hui, LUO Dong-hong, et al. Experimental study of pressure drop of single phase in cylindrical cyclone[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2010, 25(6): 851-856.
- [14] LIU Hai-fei, XU Jing-yu, ZHANG Jun, et al. Oil-water separation in a liquid-liquid cylindrical cyclone[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2012, 24(1): 116-123.
- [15] LIU Hai-fei, XU Jing-yu, WU Ying-xiang, et al. Numerical study on oil and water two-phase flow in a cylindrical cyclone[J]. Journal of Hydrodynamics, 2010, 22(5 Suppl.): 790-795.
- [16] 刘海飞, 钟兴福, 许晶禹, 等. 柱型旋流器油水分离特性的数值模拟研究[J]. 中国造船, 2009, 50(增刊): 369-374.
LIU Hai-fei, ZHONG Xing-fu, XU Jing-yu, et al. Numerical study of the characteristic of oil-water separation in cylindrical hydrocyclone[J]. Shipbuilding of China, 2009, 50(Suppl.): 369-374.