

◀海洋石油装备▶

# 内联式脱液器的设计及其数值模拟<sup>\*</sup>

苏民德 俞接成 陈家庆

(北京石油化工学院机械工程学院)

**摘要:** 内联式脱液器是国外为满足海洋油气开采对分离设备紧凑、高效等新要求而研发的一种气液分离装置。在借鉴国外气液分离器的基础上,设计了直径为 203.2 mm 的内联式脱液器,并通过 Ansys Fluent 软件对其气液分离性能进行了三维数值模拟。模拟结果表明,所设计的内联式脱液器具有良好的气液分离效果,其分离效率随液滴粒径及进口流速的增大而增大;当液滴粒径大于 70  $\mu\text{m}$ 、进口流速大于 14 m/s 时,其分离效率达到 99% 以上。研究结果可为后续内联式脱液器的结构优化及工程应用奠定基础。

**关键词:** 气液分离; 内联式脱液器; 结构设计; 数值模拟; Fluent

**中图分类号:** TE952 **文献标识码:** A **doi:** 10.16082/j.cnki.issn.1001-4578.2015.02.011

## Design and Numerical Simulation of Inline Liquid Remover

Su Minde Yu Jiecheng Chen Jiaqing

(College of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Petrochemical Technology)

**Abstract:** Inline liquid remover is a gas liquid separation device developed abroad to satisfy requirements related to compact and high-efficiency equipment in offshore hydrocarbon production. With consideration to the gas liquid separation developed abroad, inline liquid remover with diameter of 203.2 mm has been designed. By using the software Ansys Fluent, 3D numerical simulation can be performed to determine gas liquid separation performances of the new device. Results of numerical simulation show the newly designed inline liquid remover has favorable gas liquid separation performances with separation efficiencies increases with increases in diameters of liquid drops and import velocities; with liquid drops diameters higher than 70  $\mu\text{m}$  and inlet velocity higher than 14 m/s, separation efficiency may be up to 99% or higher. Relevant research conclusions may provide solid foundation for structural optimization and field application of inline liquid removers in the future.

**Key words:** gas liquid separation; inline liquid remover; structural design; numerical simulation; Fluent

## 0 引 言

随着深水海洋工程技术和装备的不断发展,世界深水油气田开采的开发规模和作业水深不断增加,油气集输中的气液分离技术和分离器也面临着新的挑战:①分离器的结构需紧凑以节省海上平台的空间;②分离器的分离效率需提高以降低处理成本<sup>[1]</sup>。针对上述情况,以离心原理设计的紧凑型

分离器受到各国石油行业的青睐。

目前,国外一些公司及科研机构已研发出多种紧凑型气液分离器,例如 Merpro 公司<sup>[2]</sup>的 Azgaz 紧凑型在线分离单元、MPPT 公司的 IRIS 在线式分离器、FMC Technologies 公司<sup>[3]</sup>的内联式脱液器(Inline deliquidiser)和 Tulsa 大学<sup>[4]</sup>的圆柱形气液旋流分离器(GLCC)。其中,FMC Technologies 公司的内联式脱液器更是独占鳌头,不但运行稳定,且脱液效率达到 99.99%。但有关此类产品的公开

<sup>\*</sup> 基金项目:国家自然科学基金项目“海上油田采出水处理用旋流气浮一体化技术的机理与特性研究”(51079006);北京石油化工学院优秀学科带头人培育计划项目(BIPT-BPOAL-2013)。

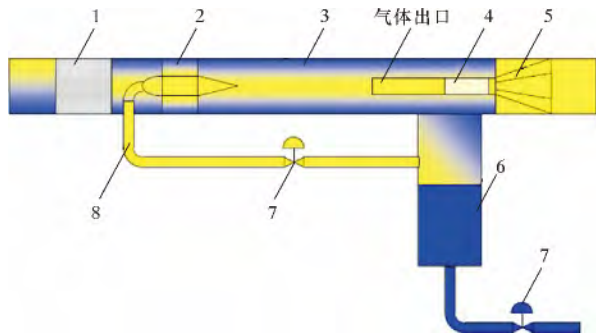
资料很少,其关键部件及内部结构通常为公司的核心机密而无法获取。随着我国油气开采由浅海向深海转移,研究开发此类紧凑、高效的气液分离装置具有重要的实际意义。

笔者在了解和借鉴 FMC Technologies 公司内联式脱液器的基础上<sup>[5-11]</sup>,自主设计了直径为 203.2 mm 的内联式脱液器,并借助 Ansys Fluent 软件对其气液分离性能进行了三维数值模拟。研究结果可为后续内联式脱液器的结构优化及工程应用奠定基础。

## 1 内联式脱液器设计

### 1.1 工作原理

图 1 所示为 FMC Technologies 公司的内联式脱液器工作原理图<sup>[8]</sup>。该内联式脱液器由气液混合段、涡流发生段、旋流分离段和气体回注旁路组成,由于其中的分离元件都安装在管状壳体内部,而且工作时可以用法兰直接与管线相连,所以称之为内联式分离器。内联式气液分离器是一种结合了紧凑高效气液分离以及恢复操作中损失压降的独特新型技术的高效分离装置。内联式气液分离器运行时通过涡流发生器产生强旋流,气液混合物在离心力作用下逐渐形成两相流,从而达到气液分离的目的。



1—气液混合器; 2—涡流发生器; 3—分离腔; 4—反涡流器; 5—扩压管; 6—集液管; 7—控制阀; 8—气体回注旁路。

图 1 内联式脱液器工作原理图

Fig. 1 Operation principles of the inline liquid remover

在内联式脱液器的进口端连接有一个气液混合器,目的是让来流中少量的液体和气体充分混合,避免在流动过程中发生分层现象,影响后续的分离效果;然后混合均匀的气流经过一个静态涡流发生器,使气液混合物产生强旋流,此时由于气液密度差,液体在离心力的作用下向分离腔内壁面运动,在壁面处形成很薄的流动液膜,而气体在管道中央部分螺旋前进,进入气体出口管道中,经过反旋流

元件消除气流的涡旋运动,以减小气体进出口压降,最终气相从扩压管流入到外部管线;而液体在分离腔末端环形空间中短暂聚集后,流入到竖直集液管中,通过调节控制阀流向外部管线,与此同时,还有少量气体也随液体进入到集液管中。为了使气体能够充分分离,在集液管和旋流发生器之间连接有一个气体回注旁路,由于气流在涡流发生器内产生强旋流,导致其末端会形成一个低压区,可以通过控制集液管中液位使气体在压差作用下返回到分离腔中,进行再次分离<sup>[5]</sup>。

### 1.2 主体结构设计

内联式脱液器的主体结构为分离腔,在其来流端依次用法兰连接气液混合器和涡流发生器,在末端连接有排气管。笔者在充分参考现有资料的基础上,自主设计了直径为 203.2 mm 的内联式脱液器。图 2 为内联式脱液器的主体结构图,图中设计参数按 1:10 标注。分离主体采用  $\phi 203.2$  mm 的直管(内径为 200 mm),长度为 1 400 mm。在分离腔两端分别安装有 DN200 的法兰,方便与其他元件及管线连接。气液混合器采用孔板式,内部连接有 2 个多孔板,两者之间相距 100 mm。

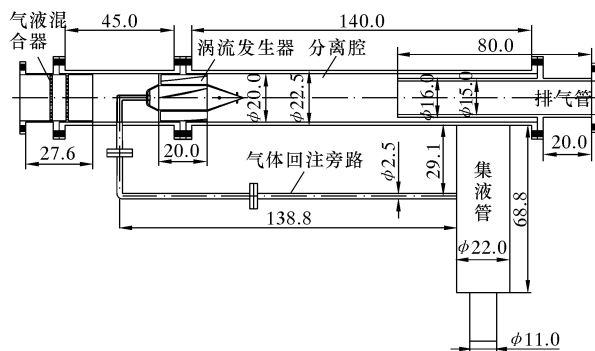


图 2 内联式脱液器的主体结构图

Fig. 2 Main structure of the inline liquid remover

### 1.3 涡流发生器的设计

气液混合物轴向进入内联式脱液器,经涡流发生器内导向叶片使其转向并加速,变为高速旋转气流,从而形成分布于分离腔内部的离心场,液体在离心力的作用下被分离出来。但是旋流叶片的具体结构参数受国外公司保密而无法获取,成为制约国内内联式脱液器发展的一大瓶颈。

图 3a 所示为笔者所设计的涡流发生器,其中内筒为气体回注旁路的通道,环状空间有 8 个固定的导向叶片,其采用螺旋线结构。图 3b 和图 3c 为导向叶片的内、外缘展开图。导叶的外缘直径等于涡流发生器筒体内径 ( $R = 190$  mm),导叶的内缘直径(根径)等于内筒外径 ( $r = 110$  mm),导叶

区高度  $H$  为 40 mm, 叶片厚度  $\delta$  为 3 mm, 导叶角度  $\beta$  为  $22.5^\circ$ 。

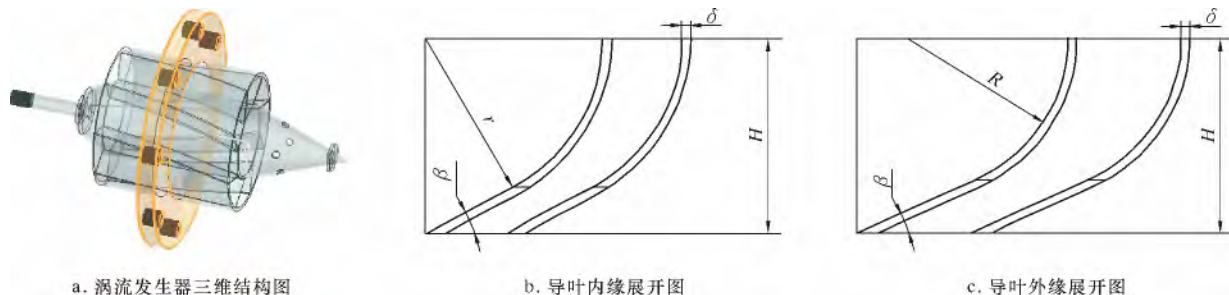


图 3 涡流发生器三维结构及导叶内、外缘展开平面图

Fig. 3 3D structure of vortex generator and plan of inner and outer edges of the propeller

## 2 Fluent 数值模拟

### 2.1 几何模型及网格划分

由于 Fluent 软件计算时系统默认进口气液混合物均相分布<sup>[12]</sup>, 故在建模时没有考虑气液混合器, 同时考虑到只有少量气体随液体进入到集液管中, 对分离效率的影响不大, 所以对气体旁路建模时也没有考虑。采用 Gambit 软件对简化后的内联式脱液器进行几何建模, 如图 4 所示。

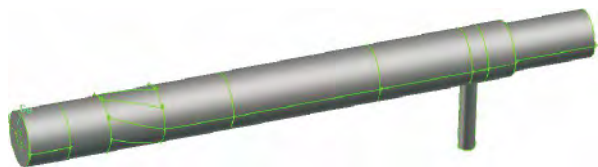


图 4 内联式脱液器几何模型

Fig. 4 Geometric model of the inline liquid remover

网格划分对数值计算精度影响较大, 为了获得较好的网格质量, 在网格划分时采用了分块划分方法。首先将整个计算域划分为 15 个子区域: 排气管、气液环形空间、气液分离空间、导叶空间 (被 8 个叶片分割为 8 个空间)、进口管、集液管、前后锥形导流空间。对于除了锥形导流区域之外的其他区域, 先用 Map 或 Pave 方式将面划分为四边形网格, 再以 Cooper 方式划分所对应的体网格, 根据气液混合物实际流动的特点, 手动控制每个子区域轴向网格的疏密程度, 而锥形导流区域则由 Gambit 软件以 Tgrid 方式自动生成网格。内联式脱液器局部网格划分情况如图 5 所示, 整个脱液器 15 个区域共生成 1 316 443 个网格。

### 2.2 控制方程

内联式脱液器内部实际流动为气液两相流动。为了能够真实反映脱液器内混合物的流动情况, 采用 Fluent 软件中 Eulerian 模型进行相关模拟, 同时考虑到内联式脱液器内部流场为复杂的湍流流动,

因此选用目前工程中广泛应用的  $\kappa$ - $\varepsilon$  双方程模型。与上述模型相关的控制方程如下。

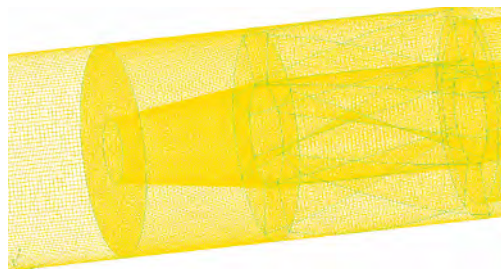


图 5 内联式脱液器计算网格 (局部)

Fig. 5 Calculation grid (regional) of the inline liquid remover

连续性方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

动量方程:

$$\frac{\partial \rho \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial (\rho \bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} + \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) - (\rho \bar{u}_i \bar{u}_j) \right] \quad (2)$$

湍动能  $\kappa$  的方程:

$$\frac{\partial (\rho \kappa)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho \kappa u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\kappa} \right) + G_\kappa - \rho \varepsilon \quad (3)$$

湍流耗散率  $\varepsilon$  的方程:

$$\frac{\partial (\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) + \frac{C_{1\varepsilon} \varepsilon}{\kappa} G_\kappa - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{\kappa} \quad (4)$$

体积分数方程:

$$V_q = \int_V a_q dV \quad (5)$$

式中,  $\rho$  为密度,  $u_i$  为速度矢量,  $\mu$  为物质的黏度,  $\mu_t$  为湍流黏性系数,  $G_\kappa$  为平均湍流动能梯度,  $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 、 $\sigma_\kappa$  及  $\sigma_\varepsilon$  均为常数, 取值分别为:  $C_{1\varepsilon} = 1.44$ ,  $C_{2\varepsilon} = 1.92$ ,  $\sigma_\kappa = 1.0$ ,  $\sigma_\varepsilon = 1.3$ ,  $V_q$  为每相的体积,  $a_q$  为每相的体积分数。

### 2.3 确定模拟方案

内联式脱液器的分离效率主要由气液混合物中液相的粒径、入口流速及旋流发生器中叶片的出口角等因素决定。图 2 中设计的内联式脱液器螺旋叶片出口角  $\beta = 22.5^\circ$ ，针对所设计的  $\phi 203.2$  mm 内联式脱液器，在模拟时液相粒径  $d$  分别取 10、30、50、70、80 和 100  $\mu\text{m}$ ，在同种液滴粒径下，入口速度  $v$  分别取 4、8、12 和 16 m/s，针对上述 24 种工况，分别对该脱液器内流动情况及气液分离效果展开模拟研究及分析。

### 2.4 模型选择及边界条件设置

采用 Fluent 软件进行模拟，气液混合物为湍流流动，选用标准  $k-\varepsilon$  湍流模型，气液混合物选用 Eulerian 模型，气为连续相、水为离散相，设置液相的体积分数为 3.5%，气液混合物中的气相和水相分别采用 Fluent 介质数据库中的空气和水，其物性参数分别为：空气密度为  $1.225 \text{ kg/m}^3$ ，黏度系数为  $1.7894 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ；水的密度为  $998.2 \text{ kg/m}^3$ ，黏度系数为  $0.001003 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ；气液混合物进口为速度入口边界条件，气相和液相出口条件均设置为 outflow 出口，选用的离散格式为压力-速度耦合，计算选用 Simplec 算法，压力计算选用标准格式，其他均选用一阶迎风格式。通过 Fluent 软件对 3.3 所示的不同入口流速和不同液滴直径进行了三维数值模拟。

## 3 数值模拟结果分析

### 3.1 速度场特性分析

气流在内联式脱液器内流动过程中，由起始的轴向流动经涡流发生器后变为复杂的旋转流动，分析流动域内的速度场分布情况对了解内联式脱液器分离性能有重要的意义。

图 6 为内联式脱液器不同横截面上的切向速度等值线分布云图。从图中可以看出，气流在进入涡流发生器之前，切向速度几乎为 0，只有靠近锥形导流体的部分区域切向速度略有增加，整体表现为轴向流动；气流在涡流发生器内受导向叶片的作用，切向速度迅速增大，由原来的轴向流动逐渐变为旋转流动，同时在靠近叶片外缘处的切向速度明显高于其他区域；气流流过涡流发生器后，由于导流锥体的存在，使得气流旋转运动更加平稳；在分离腔中，随着气流的旋转流动，整体表现出很好的对称性。总而言之，气流在流经导流叶片后，切向速度增大，促使分离腔内离心场增强，进而混合流

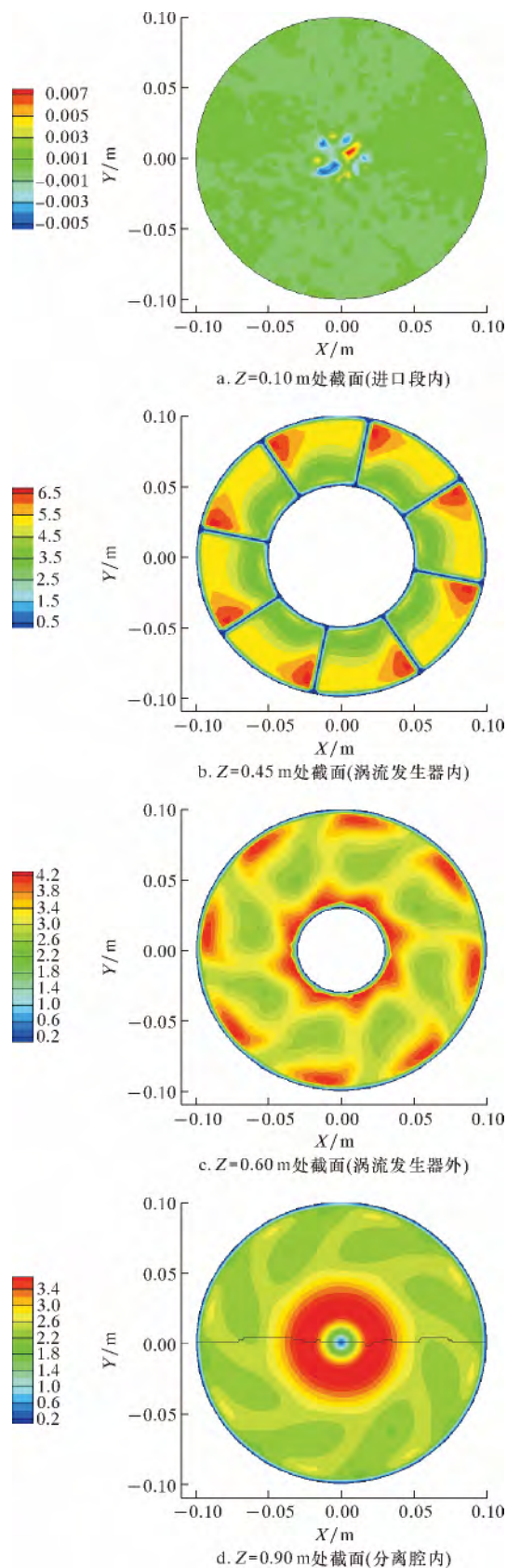


图 6 内联式脱液器不同横截面上的切向速度等值线分布云图

Fig. 6 Cloud map for distribution of tangential velocity contours at different cross sections of the inline liquid remover

发生两相分离。因此,弄清内联式脱液器内流场分布情况,对研究其气液分离特性奠定了理论基础。

### 3.2 分离效果

图 7 为  $d = 70 \mu\text{m}$ 、 $v = 12 \text{ m/s}$  时内联式脱液器内气相体积分数分布云图。其中红色区域代表气相体积分数高的区域,蓝色区域代表气相体积分数低的区域,中间橙黄色区域为含不同气相体积分数的气液混合区域。从云图可以看出,内联式脱液器在该工况下分离效果良好,右端气体出口的气相体积分数接近 100%,基本为气体,液相逐渐汇集到分离腔末端的环形空间后经排液管外排,同时有少量气体进入排液管,这也正是设置气体旁通管路的原因,气体可以通过其再次进入到分离腔前段,进而继续分离。



图 7 内联式脱液器内气相分布云图

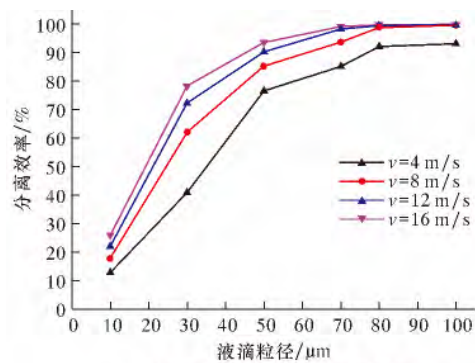
Fig. 7 Cloud map for distribution of gases in the inline liquid remover

通过 Fluent 软件,可以读取出每种计算工况下进口、气体出口、水出口的气相、液相及总的质量流率。通过计算可以求出每种情况下的除液率,即:

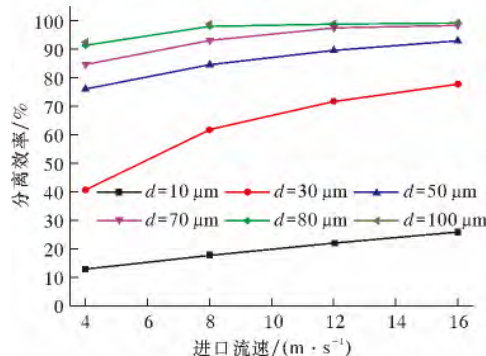
$$C = \left(1 - \frac{q_{m_w}}{q_{m_i}}\right) \times 100\% \quad (6)$$

其中,  $C$  为除液率, %;  $q_{m_w}$  为气体出口的液相质量流率,  $\text{kg/s}$ ;  $q_{m_i}$  为入口的液相质量流率,  $\text{kg/s}$ 。

按照上述方法,分别读取 24 种模拟方案下内联式脱液器的除液率,将不同工况下的除液率绘制成图,如图 8 所示。通过对除液率的数据图表进行分析,可以看出,当液滴粒径大于  $70 \mu\text{m}$  时,该内联式脱液器的分离效率基本达到 80% 以上,当进口流速大于  $12 \text{ m/s}$  时,分离效率已达到 98.2% 以上;当液滴粒径小于  $70 \mu\text{m}$  时,该管式分离器的分离效率明显下降,基本在 20% ~ 80% 之间,当进口流速大于  $12 \text{ m/s}$  时,分离效率有所提高,在 30% ~ 90% 之间;综合考虑液滴粒径及入口速度,该内联式脱液器在液滴粒径大于  $70 \mu\text{m}$ ,进口流速大于  $14 \text{ m/s}$  时,分离效果较好,可以达到 99% 以上。这充分说明了液滴粒径及进口流速是影响分离效果的重要因素,内联式脱液器的分离效率随液滴粒径及进口流速的增大而增大,液滴粒径及速度越大,分离效果越好。



a. 液滴粒径对气液分离效果的影响



b. 进口流速对气液分离效果的影响

图 8 液滴粒径及进口流速对分离效果的影响

Fig. 8 Impacts of drop diameters and inlet flow rates to separation performances

## 4 结 论

在借鉴国外公司气液分离装置的基础上,自主设计了直径为  $203.2 \text{ mm}$  的内联式脱液器,并借助 Ansys Fluent 软件对所设计的内联式脱液器进行了三维数值模拟,通过数值方法分析了其脱液性能。得到以下结论:

(1) 所设计的  $\phi 203.2 \text{ mm}$  内联式脱液器具有良好的气液分离效果,其脱液效率随液滴粒径及进口流速的增大而提高。

(2) 该内联式脱液器在液滴粒径大于  $70 \mu\text{m}$ ,进口流速大于  $14 \text{ m/s}$  时,脱液效率超过 99%。

### 参 考 文 献

- [1] 李锐峰,陈家庆,姬宜朋,等. 海洋油气开发用水下紧凑型多相分离技术 [J]. 石油机械, 2012, 40 (10): 111-117.
- [2] Abdullayev E A. Liquid/gas separator: EP, 0643610 B1 [P]. 1993.
- [3] Swanborn R A. A new approach to the design of gas-liquid separators for the oil industry [D]. Holland: Delft University of Technology, 1988.
- [4] 石熠,陈家庆,熊思,等. 海洋油气开发用内联脱

- 液器的研究与应用 [J]. 过滤与分离, 2014, 24 (1): 1-7.
- [5] Van Heel K D. Will new separation technology-make oil platforms a thing of the past [J]. Oil & Gas Industry, 2003: 12-13.
- [6] Imaduudin, Tienhaara M. Compact processing solutions: Inline gas-liquid separation on the Santos Wortel Field [C] // SPE 166572, presentation at the SPE Offshore Europe Oil and Gas Conference and Exhibition held in Aberdeen, UK, September 3-6, 2013.
- [7] Hannisdal A, Westra R, Akdim M R, et al. Compact separation technologies and their applicability for subsea field development in deep water [C] // OTC 23223, presentation at the Offshore Technology Conference held in Houston, Texas, USA, April 30-May 3, 2012.
- [8] Chin R W, Stanbridge D I, Schook R. Development and installation of an inline deliquidiser [C] // SPE 84061, presentation at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition held in Denver, Colorado, USA, October 5-8, 2003.
- [9] Bymaster A S, Olson M D, Grave E J, et al. High pressure gas-liquid separation: An experimental study on separator performance of natural gas stream at elevated pressures [C] // OTC 21781, presentation at the Offshore Technology Conference held in Houston, Texas, USA, May 2-5, 2011.
- [10] Schook R, Asperen V V. Compact separation by means of inline technology [C] // SPE 93232, presentation at the 14th SPE Middle East Oil & Gas Show and Conference held in Bahrain International Exhibition Centre, Bahrain, March 12-15, 2005.
- [11] Vissers A J W H, Asperen V V, Akdim R, et al. Performance of inline separation technology in unloading restricted or shut down wet gas wells [C] // SPE 159280, presentation at the Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference held in Abu Dhabi, UAE, November 11-14, 2012.
- [12] Fluent Incorporation. Fluent 14.5 user's guide [K]. 2009.

第一作者简介: 苏民德, 生于 1988 年, 在读硕士研究生, 现从事多相流分离技术研究工作。地址: (102617) 北京市大兴区。E-mail: suminde@bupt.edu.cn。

通信作者: 俞接成, E-mail: Jiecheng@bupt.edu.cn。

收稿日期: 2014-08-25

(本文编辑 刘 峰)

(上接第 48 页)

(3) 微惯组/磁强计组合随钻测量系统的成功研制, 使惯性技术在石油钻井行业的普及成为可能, 也为随钻测量仪器的研究提供了一种新思路。

#### 参 考 文 献

- [1] Bourgoyne A T, Millheim K K, Young F S Jr. Applied drilling engineering [M]. Richardson, TX, USA: Society of Petroleum Engineers, 1986.
- [2] 张春华, 刘广华. 随钻测量系统技术发展现状及建议 [J]. 钻采工艺, 2010, 33 (1): 31-35.
- [3] Ledroz A G, Pecht E, Cramer D, et al. FOG-based navigation in downhole environment during horizontal drilling utilizing a complete inertial measurement unit: Directional measurement-while-drilling surveying [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2005, 54 (10): 1997-2006.
- [4] 秦永元. 惯性导航 [M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [5] 侯胜明, 王以法, 管志川, 等. 基于超声波的近钻头无线随钻测斜系统设计 [J]. 石油机械, 2010, 38 (10): 1-3.
- [6] Kourepenis A, Connelly J, Sitomer J. Low cost MEMS inertial measurement unit [C] // ION NTM 2004, January 26-28, 2004, San Diego, California, USA, 2004.
- [7] 代刚, 李枚, 苏伟. 微惯性测量单元的误差整机标定和补偿 [J]. 光学精密工程, 2011, 19 (7): 1620-1626.
- [8] 许 杨, 石志勇, 杨云涛, 等. 一种基于椭球假设的地磁传感器误差补偿方法 [J]. 现代电子技术, 2010, 33 (24): 176-179.
- [9] 秦永元, 张洪钺, 汪叔华. 卡尔曼滤波与组合导航原理 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1998: 42-56.
- [10] 林铁, 林恒, 高爽, 等. 光纤陀螺测斜仪数据采集及传输单元设计与实现 [J]. 测井技术, 2009, 33 (4): 402-405.

第一作者简介: 张春熹, 教授, 博士生导师, 生于 1965 年, 1996 年毕业于浙江大学光仪系, 获博士学位, 现从事惯性技术及组合导航的研究工作。地址: (100191) 北京市海淀区。E-mail: zhangchunxi@buaa.edu.cn。

收稿日期: 2014-08-24

(本文编辑 刘 峰)