

一种旋流+膜联合油水分离器流场数值模拟

王 瑶¹, 刘 敏¹, 张成富¹, 王 胜¹, 张 译³, 张会琴^{2,4}, 史仕莛²

(1. 中海油能源发展股份有限公司 工程技术分公司, 天津 300452;

2. 中国科学院 力学研究所, 北京 100190;

3. 中海石油(中国)有限公司 深圳分公司, 广东 深圳 518000;

4. 中国科学院大学 工程科学学院, 北京 100049)

摘 要: 相对于单原理油水分离方法而言, 利用旋流+膜联合原理进行油水分离是一种新的油水分离方式。为提高井下油水分离性能, 探讨一种联合原理的油水分离器。建立旋流+膜联合油水分离器的物理数学模型, 并用数值模拟的方法计算其中的流场分布规律, 针对不同分流比、入口流速和入口含油体积分数对其性能进行系统研究。结果表明: 分流比的变化影响第一级和第二级出油口相汇流动规律, 应用时应进行性能核算从而保证两级分离的效果; 随着入口流速的增大, 旋流+膜分离性能逐渐更优, 若流速过低, 则旋流+膜分离性能较差; 随着入口含油体积分数增大, 旋流所分离的油相占比减小, 留给膜分离的油相占比增大, 即含油体积分数较大时, 旋流+膜联合油水分离的应用更有必要。

关键词: 旋流+膜联合; 油水分离; 流场; 数值模拟

中图分类号: TE95

文献标志码: A

Numerical Simulation of Flow Field in Swirl+Membrane Combined Oil-Water Separator

WANG Yao¹, LIU Min¹, ZHANG Chengfu¹, WANG Sheng¹, ZHANG Yi³,
ZHANG Huiqin^{2,4}, SHI Shiyong²

(1. Engineering Technology Branch, CNOOC Energy Development Co., Ltd., Tianjin 300452, China;

2. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

3. Shenzhen Branch, CNOOC (China) Limited, Shenzhen 518000, Guangdong, China;

4. School of Engineering Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Compared with the single principle oil-water separation method, the combined principle of swirl+membrane is a new oil-water separation method. In order to improve the performance of downhole oil-water separation, a combined principle oil-water separator is discussed. The physical and mathematical model of swirl+membrane combined oil-water separator is established. The flow field distribution is calculated by the numerical simulation method. The effects of different split ratios, inlet flow velocities and inlet oil volume fractions on the performance are systematically studied. The results show that: the change of split ratio affects the flow rule of the first stage and the second stage oil outlet, and performance accounting should be carried out to ensure the

基金项目: 海南省“陆海空”科技专项及海南省深海技术创新中心“深海技术产业促进专项”(编号: DSTIC-CYCJ-2022004)

作者简介: 王瑶 (1985-), 女, 工程师, 研究方向为采油工艺技术

effect of two-stage separation; with the increase of inlet flow rate, the performance of swirl + membrane separation becomes better, and the performance of swirl + membrane separation is poor when the flow rate is too low; with the increase of inlet oil volume fraction, the proportion of oil phase separated by swirl decreases, and the proportion of oil phase left for membrane separation increases, that is, when the oil volume fraction is high, the application of swirl + membrane combined oil-water separation is more necessary.

Key words: swirl + membrane combination; oil water separation; flow field; numerical simulation

0 引 言

能源关系一个国家的经济命脉和国防安全。近年来,在中国南海发现了相当于全球储量约 12% 的油气资源,部分资源分布在我国国界范围内^[1]。制约我国在南海深水区进行油气资源自主开发的因素之一是油水分离技术。我国现阶段常用的分离器大多为基于重力原理的罐式分离器,如果将其放至深水区,罐的壁厚至少须达 200 mm,这显然不可能做到^[2-3],有必要开发新型高效的分离器。油水分离的方法按照原理可分为旋流分离、重力分离、气浮分离、化学分离和膜分离等,每种分离方法都有各自的优点和缺点^[4]。旋流分离效率高,膜分离能够实现精细分离^[5-6],采用两者复合式分离方法能够优势互补,提高油水分离的效果。对这种新型的联合旋流分离+膜分离原理于一体的轴入流线型旋流油水分离器进行现场试验,结果表明,这是一种高效的油水分离设备^[7]。轴入流线型旋流油水分离器与亲油疏水膜联合的结构示例如图 1 所示。两者联合之后涉及如下关键问题:2 个出油口的流体能否正常汇流,是否影响两者相结合后的油水分离性能。本文从数值模拟的角度探讨旋流分离+膜分离时的流场特性,为分离器的研发提供指导。

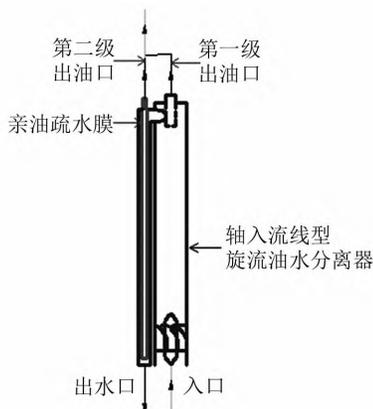


图 1 旋流+膜联合油水分离器示例

1 流场数值模拟

对于旋流器+膜的数值模拟,目前还没有发展到耦合多相流动与膜的选择透过性数值模拟,大多基于物理数学模型对流场进行模拟。为研究膜和旋流器的耦合作用,可依据膜的基本原理进行流体动力学的数值模拟,从而优选膜与旋流器的结合方式^[8]。对于上述旋流+膜联合油水分离器,膜是带有一定粗糙度的多孔状表面,油滴被膜吸附后会从孔中流入膜内,然后从第二级出油口流出,因此可将膜简化为带孔筒^[9]。

1.1 几何模型

旋流+膜联合油水分离器柱体总体高度为 1 m,柱体直径为 95 mm,亲油疏水膜直径为 35 mm,长度为 1 m,第一级出油口直径为 35 mm,第二级出油口直径为 35 mm,第一级出油口插入柱体内的深度为 60 mm,2 个出油口相汇连接。

建立物理模型并对其进行网格划分。对于旋流+膜联合油水分离器,其内部流向有变化,全部采用四面体网格划分,并对小孔进行局部加密,最终网格数量为 96 万个。

1.2 计算模型选择

目前,多相流模型中的流体体积 (Volume of Fluid, VOF) 模型是一种跟踪界面的计算模型,不适合用来计算旋流场中没有清晰界面的油水两相流动。Mixture 模型和 Euler 模型均基于欧拉-欧拉耦合方法 (Euler-Euler Coupling Method) 处理两相流动,2 种模型均有学者用于计算旋流器中的油水两相流动,本模型也基于欧拉-欧拉耦合方法。

连续性方程为

$$\frac{\partial(\alpha_q \rho_q)}{\partial t} + \nabla(\alpha_q \rho_q \mathbf{v}_q) = 0 \quad (1)$$

式中: α_q 为第 q 项的体积分数; ρ_q 为第 q 项的密度; t 为时间; \mathbf{v}_q 为 q 相的速度; 下标 q 代表分散相。

动量方程为

$$\frac{\partial(\alpha_q \rho_q \mathbf{v}_q)}{\partial t} + \nabla(\alpha_q \rho_q \mathbf{v}_q \mathbf{v}_q) = -\alpha_q \nabla p + \nabla \bar{\boldsymbol{\tau}}_q + \sum_{p=1}^n (\mathbf{R}_{pq} + \dot{m}_{pq} \mathbf{v}_{pq}) + \alpha_q \rho_q (\mathbf{F}_{\text{lift},q} + \mathbf{F}_{\text{Vm},q}) \quad (2)$$

式中： p 为压力； $\bar{\boldsymbol{\tau}}_q$ 为第 q 相的压力应变张量； \mathbf{R}_{pq} 为相间作用力； \dot{m}_{pq} 为相 p 与相 q 之间的质量转变，一般为 0； \mathbf{v}_{pq} 为相间相对速度； $\mathbf{F}_{\text{lift},q}$ 为升力； $\mathbf{F}_{\text{Vm},q}$ 为虚拟质量力。

对于两相流动，通常也都存在湍流流场。对于湍流，无论何种多相流模型，在对瞬时动量方程取平均后得到的雷诺平均方程均会产生雷诺应力项。针对雷诺应力项的求解，对于管道中油水两相流动，目前所采用的湍流模型主要有 3 类：标准 $k-\omega$ 模型、RNG $k-\omega$ (Renormalization Group $k-\omega$) 模型和 RSM 模型 (Reynolds Stress Model)。研究结果表明，RSM 具有良好的旋流湍流的模拟能力，采用 RSM 计算得到的轴向速度和径向压力分布图与试验结果吻合较好。

雷诺应力模型的表达式为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \overline{u_i u_j}) + \frac{\partial}{\partial x_k}(\rho \mathbf{u}_k \overline{u_i u_j}) = -D_{Tij} + D_{Lij} - p_{ij} + \phi_{ij} - \xi_{ij} - F_{ij} \quad (3)$$

式中： $\overline{u_i u_j}$ 为同一点处 2 个脉动速度分量乘积的平均； \mathbf{u}_k 为某点处的速度； D_{Tij} 为湍流扩散项； D_{Lij} 为分子黏性扩散项； p_{ij} 为剪应力产生项； ϕ_{ij} 为压力应变项； ξ_{ij} 为黏性耗散项； F_{ij} 为系统旋转产生项。

1.3 边界条件

(1) 入口边界条件。入口设置为均匀速度来流，速度方向沿管道轴线方向，平均速度 \bar{U}_i 计算式为

$$\bar{U}_i = \frac{Q_i}{A_i} \quad (4)$$

式中： Q_i 为入口流量； A_i 为入口截面积。分流比为出水口流量与入口流量的比值。

(2) 出口边界条件。出口均为充分发展边界条件，并设置每个口的分流比例。

(3) 壁面边界条件。固壁按无滑移固定边界条件设置，按无穿透无滑移边界处理，壁面粗糙度为 0.5，壁面处的流动变量均为 0，壁面边界条件选择标准壁面函数。

2 模型验证

入口混合流速为 0.92 m/s，入口含油体积分数为 0.06，油相密度为 850 kg/m³，黏度为 30 mPa·s，水为自来水。在前期对导流片型（入口处设置 3 个导流片，每个导流片与管道横截面的夹角为 60°）油水旋流分离器的研究中，出水口流量与入口流量的比值为 0.84。由图 2 可知，Euler 模型模拟的油水分布结果与试验结果相差不大，因此选用此模型进行后续的油水分流流动模拟。

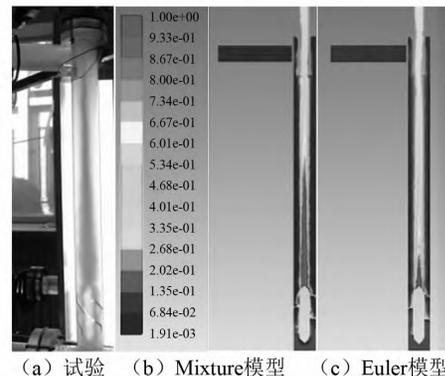


图 2 数值计算结果对比

3 数值模拟结果与分析

3.1 流场分布随分流比变化规律

当入口流速为 2.5 m/s，入口含油体积分数为 0.1 时，变化出水口分流比。图 3 为分流比从 0.7 降至 0.3，油水两相分离效果的变化规律。由图 3 可知：当分流比增大至 0.7 时，存在从第一级出油口返流至第二级出油口的流动；当分流比减小至 0.3 时，第一级出油口和第二级出油口流出的流体能够合流，即存在临界分流比使得两级出油口汇流成功。由管道截面压力 [见图 3 (g)] 可知，第一级和第二级出油管压力分布基本相同，由于流体流动主要由压降控制，第二级出油口的流体流入第一级出油口的前提条件是第一级出油口的压力必须小于第二级出油口的压力，这样第二级出油口的流体能够有足够的动能与第一级出油口的流体合流。从整体角度分析，当分流比从 0.3 增大至 0.7 时，第二级出油管中的流速始终较低，即第一级和第二级之间流通的流量较小，这在实际工况中是合理的，因为需要第二级出油管中分离出来的油相毕竟是少量的。

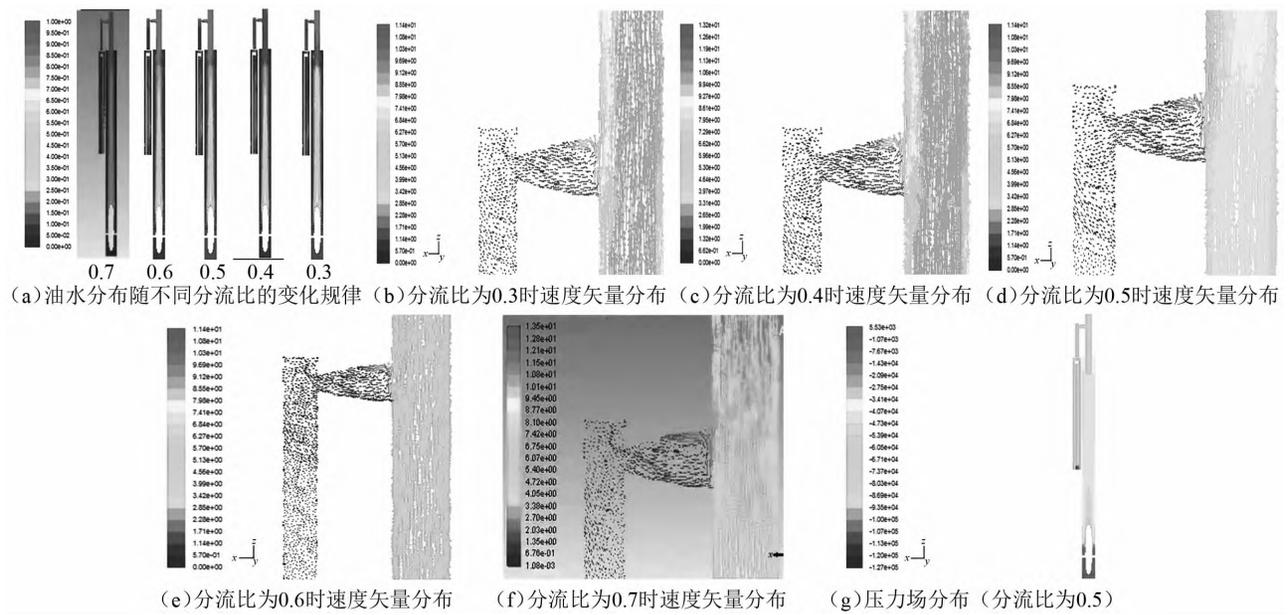


图 3 流场分布随分流比的变化规律

3.2 流场分布随入口流速变化规律

当入口含油体积分数为 0.1, 出水口分流比为 0.7, 入口流速从 0.5 m/s 增大至 2.5 m/s 时分离器截面油水两相分布如图 4 所示。由图 4 可知: 当入口流速为 0.5 m/s 时, 油核不稳定, 呈现 S 形, 这主要是由旋流强度太小, 旋流不稳定造成的; 当入口流速逐渐增大时, 油水分离在第一级流线型导流片后即实现良好的分离, 第二级左侧安装膜的管道中油相逐渐减小, 分离性能更优, 说明旋流+膜联合油水分离器的分离性能随着入口流速的增大而变得更优。

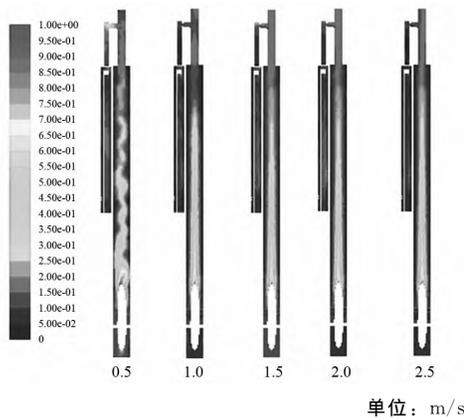


图 4 油水两相分离性能随不同入口流速的变化规律

3.3 流场分布随含油体积分数变化规律

当入口流速为 1.5 m/s, 出水口分流比为 0.7, 入口含油体积分数从 0.01 增大至 0.15 时, 油水两相流场分布随含油体积分数的变化规律如图 5 所

示。由图 5 可知: 当含油体积分数较小时, 进入侧壁的油相较少; 当含油体积分数较大时, 进入侧壁的油相较多, 即当入口含油体积分数较大时, 在旋流侧安装亲水疏油膜收益更大。随着入口含油体积分数增大, 速度场分布变化不大, 两级出水口汇流的流动仍然与上述分流比相同时的流动特性相似。

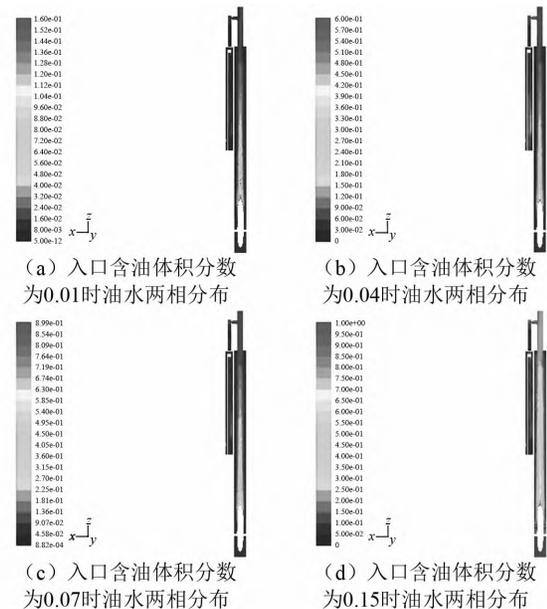


图 5 油水两相分布随不同入口含油体积分数的变化规律

4 结 论

对旋流+膜联合油水分离器在不同工况下的油

水两相流动流场进行数值模拟, 得到如下结论:

(1) 随着出水口分流比的增大, 第一级出油口与第二级出油口流体的汇流流动规律发生变化, 存在临界分流比。当出水口分流比较大时, 部分流体从第一级出油口返流至第二级出油口, 随即从出水口流出; 当出水口分流比较小时, 第一级出油口和第二级出油口流出的流体能够汇流成功, 实现油水的精细分离。

(2) 当变化入口流速时, 可发现入口流速不宜过低, 流速越高, 第一级旋流油水分离后的水中含油体积分数越小, 从而旋流+膜的联合作用效果更佳, 能够使分离后的水中含油体积分数更小。

(3) 当变化入口含油体积分数时: 当入口含油体积分数较小时, 旋流能够分离大部分油相, 留待第二级膜分离的油相更少; 当入口含油体积分数较大时, 第一级旋流分离的油相占比减小, 留待第二级膜分离的油相占比增大, 此时应用旋流+膜联合油水分离的效益更高。

从流场的角度研究旋流+膜耦合分离作用, 下一步数值模拟考虑膜的实际选择通过性将具有更直接的指导意义。

参考文献

- [1] 李婧文, 陈昌平, 孙家文, 等. 基于溃坝模型的 SPH 方法光滑函数模拟[J]. 中国海洋平台, 2017, 32(2): 34-40.
- [2] 朱林超, 王东光, 顾佳鹏. 海上石油的泄漏与防治[J]. 山东化工, 2018, 47(23): 88-89.
- [3] 陈艺敏. 组合工艺处理含油废水研究综述[J]. 宁夏工程技术, 2019, 18(3): 271-274.
- [4] 杨瑞, 张翻. 含油废水处理技术进展[J]. 当代化工, 2018, 47(8): 1695-1697, 1701.
- [5] 张文林, 李春利, 侯凯湖. 含油废水处理技术研究进展[J]. 化工进展, 2005, 24(11): 1239-1243.
- [6] WANG T, ZHANG Y Z, LI G F, et al. Preparation and characterization of alumina hollow fiber membranes[J]. Frontiers of Chemical Engineering, 2009, 3(3): 265-271.
- [7] 王胜, 刘敏, 罗昌华, 等. 海上油田新型井下油水分离及回注工艺[J]. 石油科技论坛, 2014, 33(3): 58-61.
- [8] 刘伟男, 朱成杰, 杨朝忠, 等. 基于超疏水金属微孔薄板的油水分离数值模拟[J]. 广东化工, 2021, 48(8): 60-60, 68.
- [9] 张浩, 廖全. 新型复合金属氢分离膜强化氢传输的数值模拟[J]. 电源技术, 2014, 38(2): 269-271, 285.

(上接第 103 页)

6 结 论

结合 ANSYS 软件及热力学经典理论分析和计算, 得出以下结论:

(1) 建立水下井口热-结构力学轴对称有限元模型, 对海床以上的部件由热膨胀产生的轴向载荷进行计算, 并运用经典热力学理论对套管窜由热膨胀产生的轴向载荷进行分析和计算。在解决较为复杂的结构及环境问题耦合时, 运用建模及理论结合是较为科学的研究和分析方法。

(2) 在解决和评估复杂的工程问题时, 会进行一些假设和简化, 为了工程的安全, 最稳妥是趋于保守的假设, 例如环空密封总成锁环上下的压差和套管的重量均有助于锁紧, 这些力在计算时没有考虑, 因此该评估方法安全、有效。

参考文献

- [1] PENA B, ARAMENDI G, RIVERO A, et al. Monitoring of drilling for burr detection using spindle

torque[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2005, 45(14): 1614-1621.

- [2] 唐海雄, 张俊斌, 汪顺文, 等. 高温致测试管柱伸长和受力计算分析[J]. 石油机械, 2010, 38(5): 84-86, 91.
- [3] 隋晓东. 热采水平井完井管柱受力分析及优化技术研究[D]. 北京: 中国石油大学, 2011.
- [4] 黄红端. 考虑多因素的热采水平井套管柱安全评价研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2013.
- [5] 王波. 高温高压完井管柱力学分析及安全评价[D]. 成都: 西南石油大学, 2014.
- [6] 艾爽, 程林松, 刘红君, 等. 深层高温高压气井临界产量计算模型[J]. 计算物理, 2015, 32(3): 327-333.
- [7] 姜洋. 热采侧钻水平井完井管柱受力分析及强度校核[D]. 大庆: 东北石油大学, 2016.
- [8] 李波. 热采水平井完井管柱力学行为模拟研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2017.
- [9] 李军鹏. 天然气井生产管柱力学分析[D]. 北京: 中国石油大学, 2017.
- [10] 杨向同, 沈新普, 王克林, 等. 完井作业油管柱失效的力学机理: 以塔里木盆地某高温高压井为例[J]. 天然气工业, 2018, 38(7): 86-92.
- [11] 张智, 王汉. 多封隔器密闭环空热膨胀力学计算方法及应用[J]. 天然气工业, 2016, 36(4): 65-72.