

一种管道式导流片型油水分离器研究

史仕英, 吴应湘, 马乃庆, 王淑京

(中国科学院力学研究所 LHO, 北京, 100090, Email: shishiying123@163.com)

摘要: 提出和试验了一种用于油水分离的新型管道式导流片型分离器, 与切向入口旋流器相比结构更紧凑, 更适合于井下油水分离。同时, 运用 Fluent 软件对其油水分离情况进行了数值模拟, 计算基于 Mixture 两相流模型、雷诺应力湍流模型。数值模拟结果显示, 导流片的形状和安装角度影响其分离性能, 存在最优角度和形状。这些为进一步优化管道式导流片型油水分离器促进其工业应用提供了一定的指导。

关键词: 管道式分离器; 油水分离; 导流片; 实验; 数值模拟

1 引言

目前国内陆上油田大部分已进入开发的中后期, 油井采出液含水率不断增高, 甚至使得部分油井产出液中的水量远远超过油量, 降低了油井的开采价值。采用井下油水分离技术将一部分分离后的水直接回注地层, 将分离后的富油混合物举升至地面, 既可以保持油藏压力, 减少举升至地面的产出水量费用, 还可以提高采收率, 延长老油田的开采期^[1]。井下油水分离技术是 20 世纪 90 年代开始出现的, 它分为旋流分离型和重力分离型, 显然旋流分离型在油水处理量上明显优于重力分离型, 其核心分离部件即液-液式旋流器^[2]。

在井下进行油水分离, 由于井下作业空间有限, 因此分离器的空间结构越紧凑越好, 而传统的油水分离旋流器为锥形切向式入口, 径向结构所要求的空间较大^[3], 设备不够紧凑, 切向式入口湍流较为严重, 分散相液滴容易破碎^[4], 一旦液滴破碎成一定大小的小液滴, 将很难实现低含油水的分离, 在无法直观检测的情况下, 有使产出水含有人量原油回注的风险。为提高井下旋流器的油水分离性能, 国内外学者均积极改进旋流器结构或者开发试验新产品^[5-6], 在此背景下, 本研究提出一种新型油水旋流分离器—管道式导流片型油水分离器。它与前人研究的旋流油水分离的分离器是不同的, 如锥形旋流器^[7]和柱形旋流器^[8]是利用两相的反向流动进行油水分离, 而新型管道式导流片型油水分离器中不存在反向流动, 减小了两相在分离后重新掺混的风险。

2 试验

2.1 试验流程和分离器结构

管道式导流片型油水分离器实验系统见图 1，系统流程主要由供液循环管路系统、泵与电机、管道式导流片型油水分离器模型及测量装置系统组成。在试验过程中，油和水通过油泵和水泵，分别从油箱和水箱中流出，经涡轮流量计测得油相流量和电磁流量计测得水相流量后，在 Y 形管处混合按照一定的比例混合后，进入管道式导流片型油水分离器中。经过分离后，清液由取样口流出进入取样桶，富含油的液体通过管线回到罐中，与经泵从取样桶抽回的液体一起在重力沉降分离后，油流回油箱，水进入水箱，从而实现循环试验。

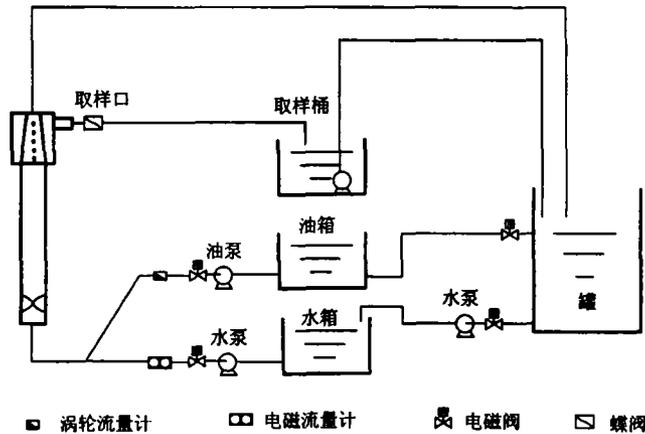


图 1 管道式导流片型油水分离器结构示意图

管道式导流片型油水分离器的结构见图 2，其工作原理是利用轴向安装的导流片形成旋流场，在旋流场中油由于密度小向轴心运动，水则分布在管壁附近，在稳定的油核形成之后，水由锥段管壁上切向开孔中分离。其尺寸如图中所标，其中安装导流片时使其与管道横截面的夹角为 20° ；锥段开设 5 排孔，在锥段均匀布置；每排 4 个孔并沿圆周对称布置，孔径 3.5mm。

在关于管道式导流片型油水分离器分离性能的试验研究中，试验介质为 LP-14 白油和水，两种介质在试验测试条件下的物性参数如下： $\rho_o = 836.0\text{kg/m}^3$ ， $\mu_o = 0.245\text{kg/m}\cdot\text{s}$ ，

$$\rho_w = 998.0\text{kg/m}^3, \mu_w = 0.001\text{kg/m}\cdot\text{s}。$$

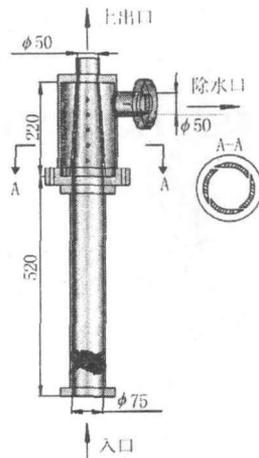


图2 管道式导流片型油水分离器结构尺寸示意图

2.2 试验结果分析

2.2.1 分流比对分离的影响

由于管道式导流片型油水分离器同其它分离设备一样，油水在其中是不完全分离的，因此引入分离效率 ε 这一概念评定其分离性能。又因为其应用在井下主要是为了从油中分离出水来，因此对分离效率的定义类似 A Belaidi^[9] 文中的定义，即

$$\varepsilon = \frac{Q_{CW}}{Q_{RW}} = 1 - \frac{k_{SW}(1-F)}{k_{RW}} \quad (1)$$

式中， Q_{CW} —— 出水口含水率；

Q_{RW} —— 入口含水率；

k_{SW} —— 上出口含水率；

k_{RW} —— 入口含水率；

F —— 分流比。

分流比的定义如下：

$$F = \frac{Q_C}{Q_R} \quad (2)$$

式中， Q_C —— 出水口流量；

Q_R —— 入口流量。

当入口含油率为 11%，流量为 $3.655\text{m}^3/\text{h}$ ，变化分流比时，上出口含油率和分离效率随分流比增大的变化规律见图 3。从图 3 中可以看出，随分流比的增大，上出口含油率不断增加，除水口含油率不超过 250×10^6 ，分离效率也在不断增加。从图 4 管道式导流片型油水分离器中的油水两相分布可以看出（其中灰色的代表油相，其余的代表水相），油水两相混合物经过导流片后迅速分离，分离后的油分布在管道中心，水分布在管壁附近。水从锥段的孔中流出，从而实现了油水分离。当分流比逐渐增大时，通过上出口的流量减小，流体流过上出口的平均轴向速度减小，流体在分离器中的停留时间延长，油相增多，故油核变粗，使得油核边缘靠近出水孔，部分油滴被水从出水孔中带走，使得出水口含油率增大，但是由于油相几种的管道中心，从出水口流出的绝大部分是水相，故上出口的含油率随着分流比增大而增大。

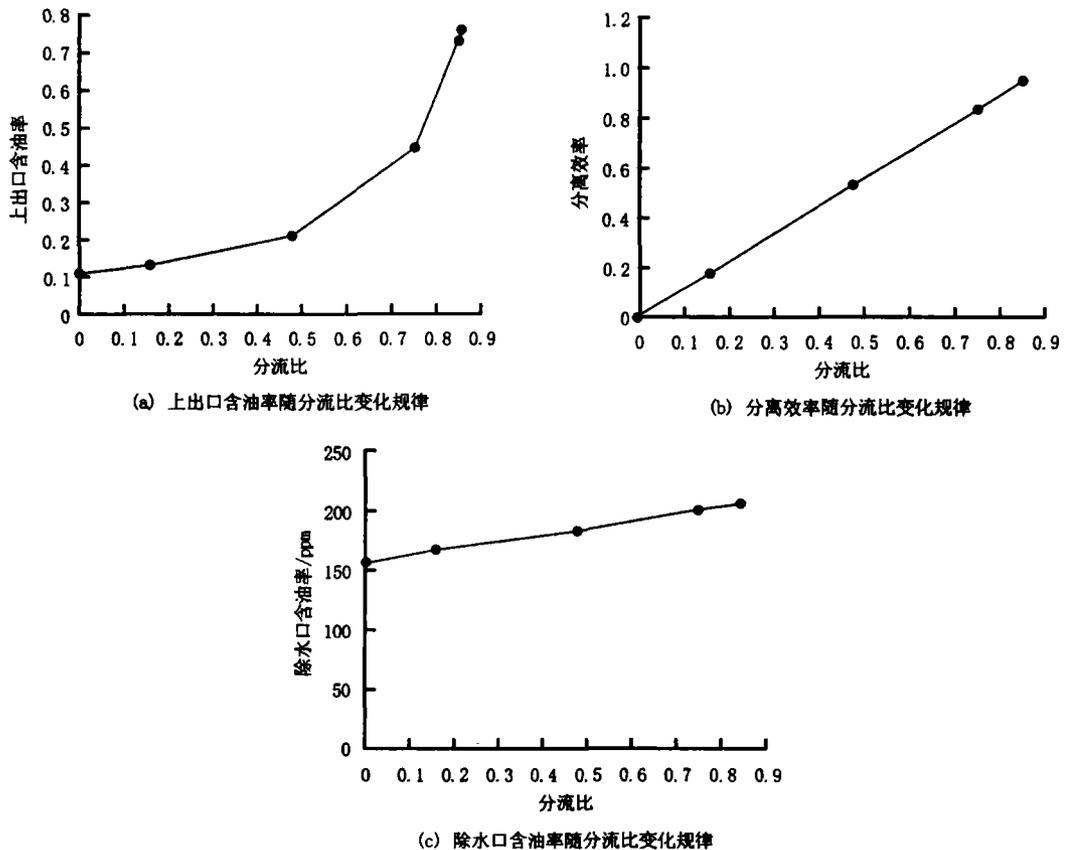


图3 分流比对分离效果影响规律

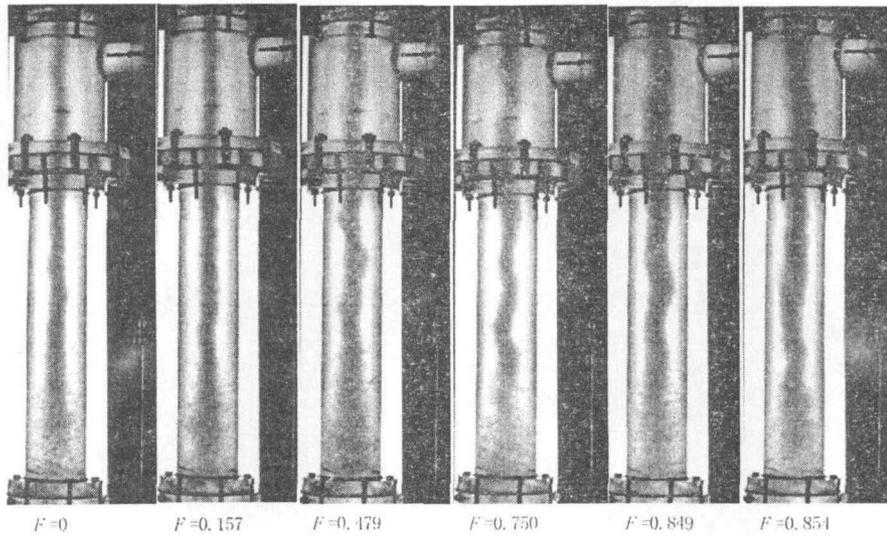


图4 管道式导流片型油水分离器中油水两相分布

2.2.2 入口流量对分离效果的影响

当入口含油率保持在2%不变时,增大入口流量,图5显示了出水口含油率在不同入口流量下随分流比变化规律图。可以看出,当入口流量低于 $13.81\text{m}^3/\text{h}$ 时,出水口含油率基本上均低于 300×10^{-6} ;当入口流量达到 $13.81\text{m}^3/\text{h}$ 时,除水口含油率随分流比增大迅速增大。试验发现,随着入口流量的增大,管道式导流片型油水分离器中的油相平均粒径逐渐减小,在入口达 $13.81\text{m}^3/\text{h}$ 时,油相粒径已经相当小,而油相在分离器中的停留时间也在减小,因此,部分小油滴在还没运动到轴心就已经到达出水孔,从而从出水口流出。可以看出,在入口流量为 $3.32\text{m}^3/\text{h}$ 时,可以分出89.8%含油率低于 300×10^{-6} 的水回注地层。

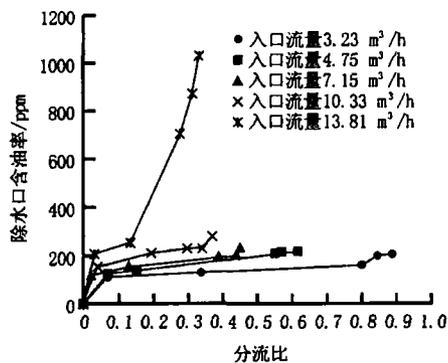


图5 入口流量对分离的影响

由于试验条件有限,为了节省成本,提高效率,采用数值模拟对管道式导流片型油水分离的结构进行进一步的优化。在本设计中,导流片是形成旋流场的关键,为此,利用数值模拟对导流片结构对分离影响进行了相关计算。

3. 数值模拟

3.1 多相流模型

油水在管道式导流片型油水分离器中的分离,其内部流动是二相流,Fluent 中提供了 VOF、Mixture 和 Eulerian 3 中多相流模型,其中混合模型是一种简化了的多相流模型,用于模拟各相有不同速度的多相流,但是假定了在短空间尺度上局部的平衡。相之间的耦合关系是很强的^[10],由于篇幅有限,具体的连续方程和动量方程等参照文献[11]。

3.2 湍流模型

在管道式导流片型油水分离器中,流体经过导流片使流线迅速弯曲,RSM 湍流模型充分考虑了由于流体选择或流线弯曲所带来的应力张量的急剧变化,所以非常适合模拟有高速旋转流动的复杂流场。前人的研究表明^[12-13],RSM 湍流模型能够模拟带有高速选择流动的复杂流场,由于篇幅问题,具体的控制方程详见文献[12]。

3.3 网格及边界条件

计算采用的物理模型与实验相同,划分的网格数约 85×10^4 个,并在导流片和除水孔附近进行了局部加密,以增加计算精度。拟计算的导流片形式如图 6 所示,设计时保证导流片的片数相等,导流片出口处切线与管道横截面的夹角均为 20° ,同时保证导流片外准线沿圆周方向缠绕 180° 。

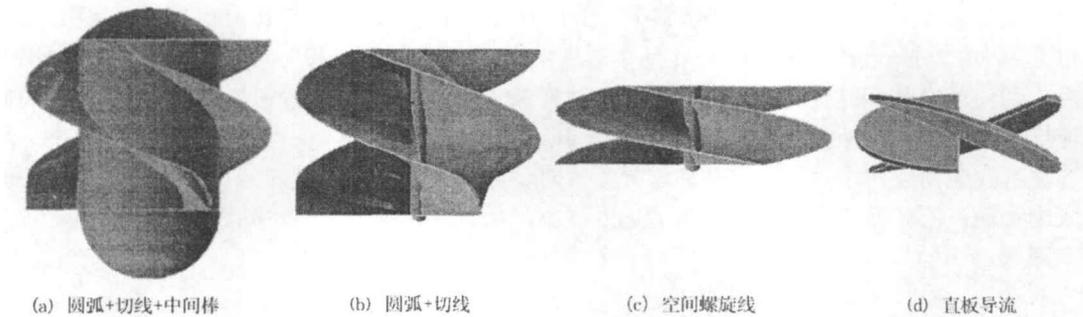


图6 不同导流片形式示意图

入口边界:油水两相的入口流速为 5m/s ,含油率 0.15 ;出口边界:除水口和上出口均定义为自由出流边界条件;壁面设为无滑移壁面边界,并采用标准壁面函数。

3.4 模型验证

为了验证上述模型的计算精度,对试验进行了计算,当入口含油率为 11% ,流量为 $3.655\text{m}^3/\text{h}$,分流比为 0.854 时,数值模拟的结果和试验情况对比见图 7,可见油水两相在管道式导流片型油水分离器中的分布基本一致,数值模拟与试验结果的误差在 5% 以内,因此可以用上述方法计算管道式导流片型分离器中的油水分离情况。

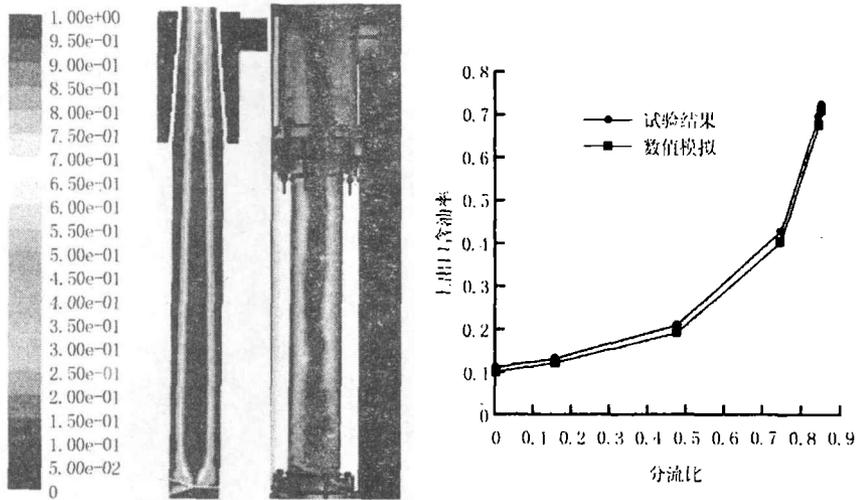


图7 数值模拟的验证

3.5 计算结果

3.5.1 导流片安装角度对分离的影响

在上述试验基础上, 改变导流片与管道横截面夹角即安装角度, 并进行了数值模拟。模拟结果如图 8 所示, 发现在入口流量为 $5.0\text{m}^3/\text{h}$, 含油率为 0.2, 分流比为 50% 时, 导流片安装角度为 30° 时, 分离后的上出口含油率最高, 而在安装角度为 40° 时, 上出口含油率最低。由于切向速度是形成旋场的关键, 当导流片安装角度过大时, 流体经过导流片导流后的切向速度较小, 油滴在径向上受到的离心力、向心浮力均相对较小, 使得径向沉降速度减小; 当导流片安装角度较小时, 流体在通过导流片时动能损失大, 同时使油滴易收到剪切而被挤碎成小油滴, 同样使得油相的径向沉降速度减小, 最终使得油滴从除水孔流失使得上出口含油率降低。

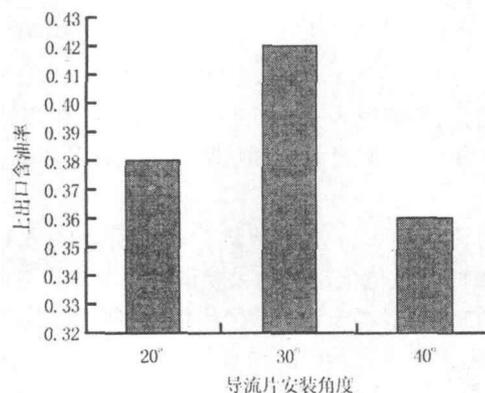


图8 导流片安装角度对分离的影响

3.5.2 导流片形式对分离的影响

当导流片安装角度为 20° 时, 改变导流片形式时, 发现在入口流速为 5m/s , 含油率为 0.15, 分流比为 0.341 时, 各导流片形式导流后轴截面相分布见图 9, 直观看来, A 型即圆弧+切线

型的叶片安装在一个粗棒上导流后的油核浓度较高，而 B 型导流后的效果最差。从图 10 可以看出，A 型和 D 型的导流片导流后的上出口含油率较高，B 和 C 相当，即 A 型导流片导流后的效果较好。

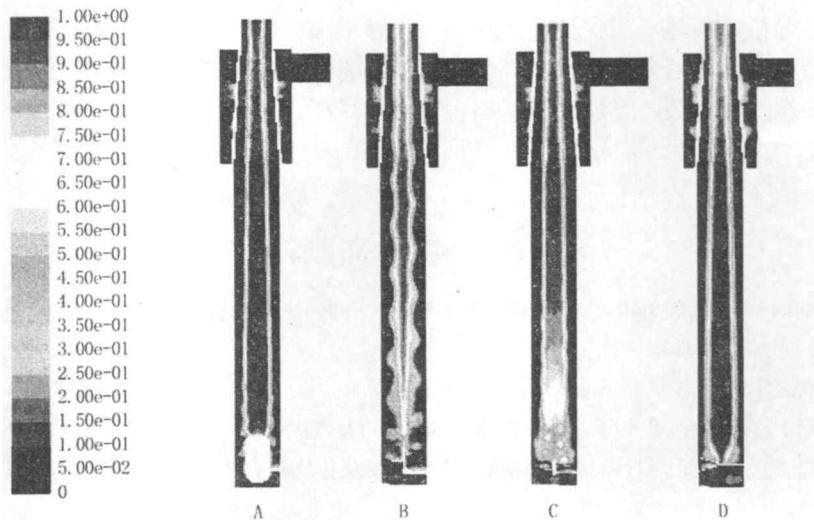


图9 不同导流片结构导流后的相分布

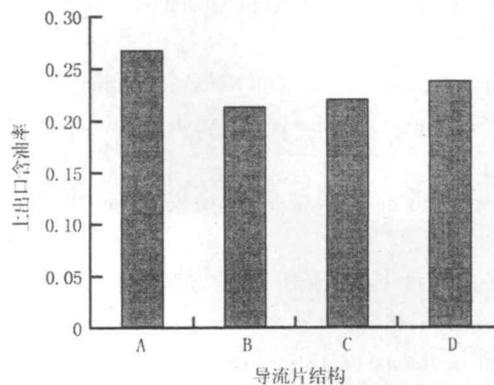


图10 不同导流片结构导流后的上出口含油率

4 结论

(1) 通过对管道式导流片型油水分离器的试验研究，发现其能够有效地分离油水。当入口含油率为 11%，流量为 $3.655\text{m}^3/\text{h}$ ，随着分流比的增大（低于 0.854 时），上出口含油率逐渐增大，分离效率逐渐增大，除水口的含油率低于 250×10^{-6} 。

(2) 当入口含油率保持在 2% 不变时，随入口流量增大时，在相同的分离比下，在入口流量低于 $13.81\text{m}^3/\text{h}$ ，虽然除水口含油率逐渐增大但试验点均低于 400×10^{-6} ；当入口流量等于 $13.81\text{m}^3/\text{h}$ ，出水口含油率随分流比增大迅速增大；在入口流量为 $3.32\text{m}^3/\text{h}$ 时，可以分出 89.8% 含油率低于 300×10^{-6} 的水。

(3) 数值模拟发现: 导流片的安装角度对分离有影响。在入口流量为 5.0m³/h, 含油率为 0.2, 分流比为 50%时, 30° 的安装角度导流后的分离效果最好, 即导流片的安装角度既不能太大也不能过小。

(4) 数值模拟显示当保持导流片出口与管道横截面的夹角不变时, 导流片形式对管道式导流片型油水分离器分离效果有影响。其中, 圆弧+切线的叶片安装在粗棒上的导流片形式导流后的油核浓度最高, 导流后的上出口含油率最高。

参考文献:

- 1 CMMatthews, RCChachula, et al. Application of Downhole Oil/Water Separation Systems in the Alliance Field. 1996, SPE 35817
- 2 钟功祥, 庞学东, 吕志中. 井下油水分离旋流器数值仿真分析. 石油矿场机械, 2009, 38 (2) 55-58.
- 3 王尊策, 于玲玲, 徐艳, 等. 井下油水分离旋流器大锥角参数优化. 大庆石油学院学报, 2009, 3 (2) : 78-80
- 4 俞接成, 陈家庆, 韩景. 轴向入口油水分离水力旋流器及其数值模拟. 北京石油化工学院学报, 2009, 17 (2) : 20-23.
- 5 John A Veil. 井下油水分离新技术. 国外油田工程, 2001, 17 (8) : 22-23.
- 6 蒋明虎, 芦存财, 张勇. 井下油水分离系统串联结构设计. 石油矿场机械, 36 (12) : 59-62.
- 7 Martin Thew. Hydrocyclone redesign for liquid-liquid separation. The Chemical Engineer, July/August, 1986: 17-23.
- 8 COropeza-Vazquez, EAfanador, LGomez, et al. Oil-Water Separation in a Novel Liquid-Liquid Cylindrical Cyclone (LLCC) Compact Separator-Experiments and Modeling. Journals of Fluids Engineering, JULY 2004, Vol. 126:553-564.
- 9 A Belaidi, M Thew. Drop size effects on a de-watering hydrocyclone. 5th International Conference on Cyclone Technologies, 2001.
- 10 江帆, 黄鹏. Fluent 高级应用于实例分析. 北京: 清华大学出版社, 146-148.
- 11 Shi-ying Shi, Ying-xiang Wu, Jun Zhang. et al. A study on separation performance of a vortex finder in a liquid-liquid cylindrical cyclone. Journal of Hydrodynamics, Ser. B, 2010, 22(5): 391-397
- 12 罗然, 张伟, 王家辉, 等. 用CFD确定物性参数对井下油水分离效率的影响. 石油与化工设备, 2010, 13:23-26
- 13 Sooran Noroozi, Seyed Hassan, Hashemabadi. CFD simulation of inlet design effect on deoiling hydrocyclone separation efficiency. ChemEngTechnol, 2009:1-10.

Study about a kind of vane-type pipe separator for oil-water separation

SHI Shi-ying, WU Ying-xiang, MA Nai-qing, WANG Shu-jing

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100190, Email: shishiying123@163.com)

Abstract: Experiment about oil-water separation in a new kind of vane-type pipe separator which is more compact and suitable for downhole oil-water separation compared with tangential inlet cyclone is carried out in this article. At the same time, based on two-phase flow model-Mixture and Reynolds Stress Model, oil and water separation in this new separator is simulated using Fluent. Numerical simulation shows that the shape and installation angle of the guiding vane influence its performance and optimal structure exist. These studies provides some guidance for further structure optimization of vane-type pipe separator for oil-water separation and speed up their industrial application process.

Key words: Pipe separator; oil-water separation; guiding vane; experiment; numerical simulation