

# 除水孔结构对管道式导流片型分离器 油水分离影响研究

史仕英, 吴应湘, 许晶禹, 李华, 李东晖, 马乃庆

(中国科学院力学研究所, 北京, 100080, Email: [shishiying123@163.com](mailto:shishiying123@163.com))

**摘要:** 经过初步的实验室实验, 发现新型管道式导流片型分离器分离性能良好, 能够实现高效油水分离。但是影响其分离性能的因素很多, 如除水孔结构直接关系着分离器的除水效果。为了研究除水孔的形状和开设方式对油水分离的影响, 在室内开展了相关试验, 并运用 Fluent 软件对其油水分离情况进行了三维数值模拟。计算基于 MIXTURE 两相流模型、雷诺应力湍流模型。研究结果得到了最优的除水孔结构, 这些为进一步优化管道式导流片型油水分离器结构、推进其在井下油水分离系统中的应用具有重要意义。

**关键词:** 管道式导流片分离器; 油水分离; 除水孔; 实验; 数值模拟

## 1 引言

世界上许多常规油田开采进入中后期, 含水率逐年增高, 生产成本上升, 濒临经济开采极限。造成这一现状的根本原因在于将水采出地面所带来的沉没资金消耗, 为此, 国外在 20 世纪 90 年代提出井下油水分离的概念, 即在井下将水分离并就地回注地层。在井底条件下将采出水注入注水层, 可节省将这一部分液体提升到地面的能量, 减轻由于污水含量高而引起的油井管柱及地面管线内壁腐蚀, 避免采出及注入过程产生的热量损失等, 具有很多优点<sup>[1]</sup>。

目前井下油水分离器现场实验大部分采用锥形旋流器, 锥形旋流器在空间上呈二维结构, 入口处于径向尺寸最大处, 径向结构所要求的空间较大<sup>[2]</sup>, 这在空间十分有限的井下, 结构显得非常不紧凑, 为了在井下使用锥形旋流器, 一般将其尺寸减少, 但同时降低了处理量, 为了增大处理量, 通常将锥形旋流器并联, 使得井下油水分离系统结构复杂, 增大了操作难度, 有研究表明, 复杂的井下油水分离系统设计是限制其使用的主要原因之一<sup>[3]</sup>。

## 2 新型管道式导流片型油水分离器结构

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<sup>[4-5]</sup>, 在此背景下, 提出了新型的管道式导流片型油水分离器, 其结构如管道式导流片型油水分离器的结构(图 1), 油水混合液在与管道横截面夹角为  $30^\circ$  安装的 3 个导流片导流作用下, 形成旋流场。在旋流场中, 由于油相密度小, 在旋流场中所受到的向心浮力大于离心力而向轴心运动并分布在管中心区域, 密度大的水相向相反的方向运动分布在管壁附近, 在形成稳定的油核之后, 分布在壁面附近的水由锥段管壁上切向开孔流出从而实现油水分离。其

尺寸如图 1 所示,; 锥段均布 5 排孔, 每排 4 个孔并沿圆周对称布置, 孔径 3mm。

由管道式导流片型油水分离器的结构可以发现, 导流片的结构是否合理影响导流后旋流场的好坏, 除水孔的结构优劣影响除水效率。除水孔的结构开设是否合理影响除水效率, 为了研究除水孔的结构对油水在其中分离的影响, 除水孔的开设方式有三种(表 1)。

表 1 除水孔开设方式编号

	圆孔与壁面圆周相切	圆孔与壁面夹角 30°	圆孔与圆周相切, 并与轴向呈 60° 夹角
编号	a	b	c

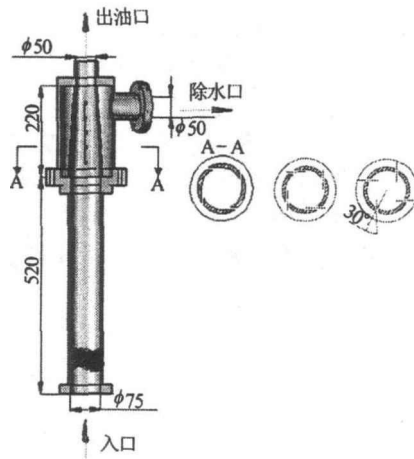


图 1 管道式导流片型油水分离器结构尺寸示意图

### 3 除水孔开设方式对油水分离的影响

本研究利用 fluent 开展了除水孔开设方式对于除水效果的数值模拟。控制方程见文献[6], 相关的网格划分、离散格式和边界条件等设置同文献[7]。

为了比较不同除水孔形状对分离性能的影响, 先定义分流比的概念如下:

$$F = \frac{Q_c}{Q_i} \quad (1)$$

其中,  $Q_c$  为除水口流量;

$Q_i$  为入口流量。

当入口流量为 10.33m<sup>3</sup>/h,入口含油率为 0.10, 除水口分流比为 0.311, 图 2 显示了不同的除水孔开设方式对油水分离分布的影响, 可以看出, 三种除水孔开设方式均能够分离油水。

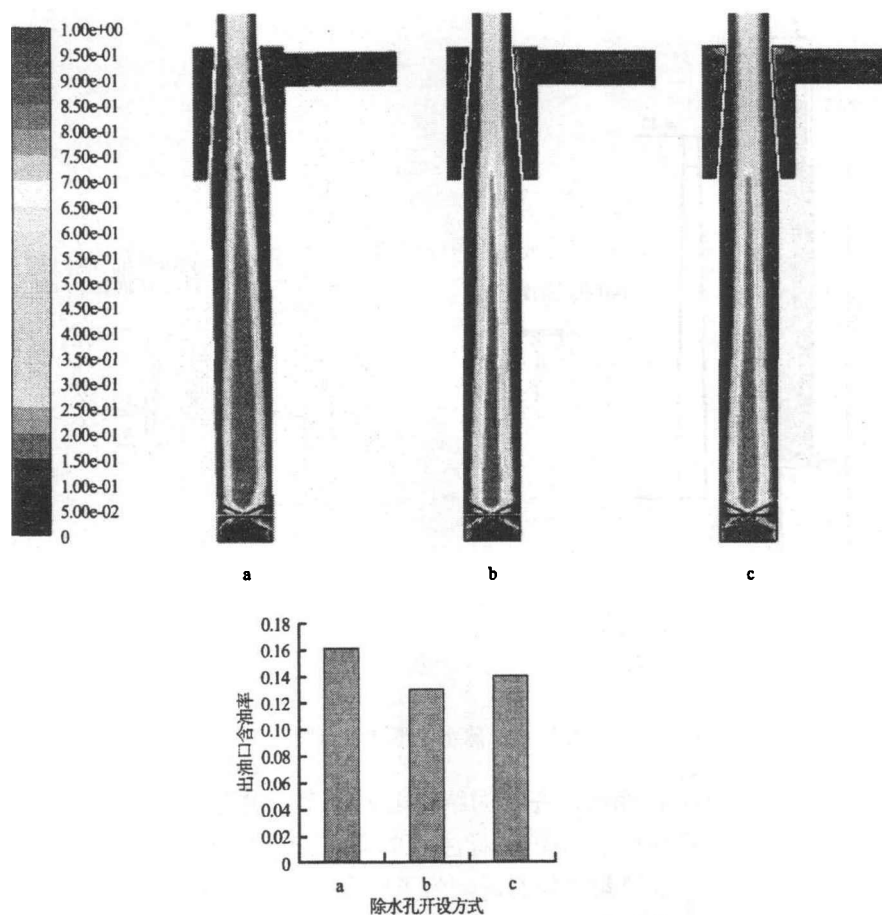


图 2 不同除水孔的开设方式对油水分离的影响

区别在于经过除水孔后，a 型除水孔开设方式除水后出油口的含油率最高，b 型最差，也就是经过 a 型除水孔后的水口含油率最低，c 型次之，经过 b 型除水孔的水中含油率最高。数值模拟显示切向开孔的效果最好，这一点不难解释，由于油水相在管道中均呈螺旋前进，为了降低除水口水中含油率，需降低水从壁面上除水孔流出时对中心区域油相的干扰，所以孔应该与壁面相切开设。又油水两相沿轴线螺旋向前运动，其在锥段螺旋前进的方向是很难确定的，因此，结合除水管道水平开设，除水孔水平开设即可。

#### 4 除水孔形状对油水分离的影响

为了使管道式导流片型油水分离器结构更紧凑，将除水管道即除水口竖直开设(图 2)。

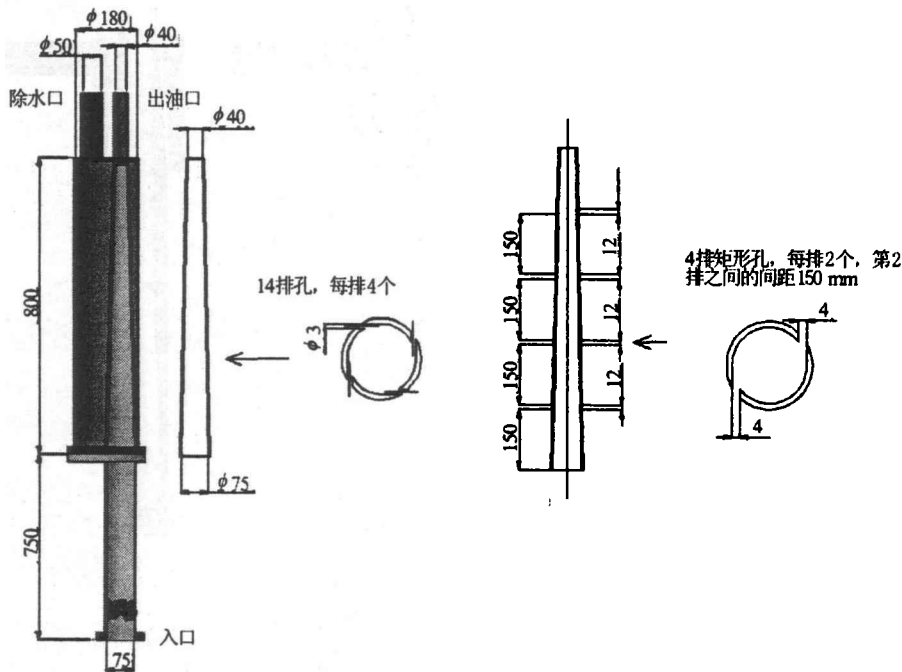


图 2 不同除水孔形状示意图

这种结构与传统的锥形旋流器相比，在空间结构上更紧凑，实现了一维结构设计，更适合用于井下空间安装，其结构尺寸标注如图 2 标注（单位：mm）。由于先前的实验发现，在一定的入口压力下，通过除水口的流量比较有限，为了增大从除水口的流量，增加除水孔的数量。并在保证总的除水孔面积相等的前提下（由于加工限制，最后稍有偏差），设计了矩形除水孔，由于矩形孔只有 8 个，圆形孔共有 56 个，也即 7 个孔相当于一个矩形孔。设计的除水孔与壁面的夹角有两种，一种保持孔与壁面相切，一种开孔方向与壁面切线方向呈  $30^\circ$ （与导流片安装角度相同）（图 2），所有的管壁壁厚 5mm。

#### 4.1 除水孔形状对油水分离的影响

为了研究除水孔结构对其分离效果的影响，建立了如下实验系统（图 3）。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。

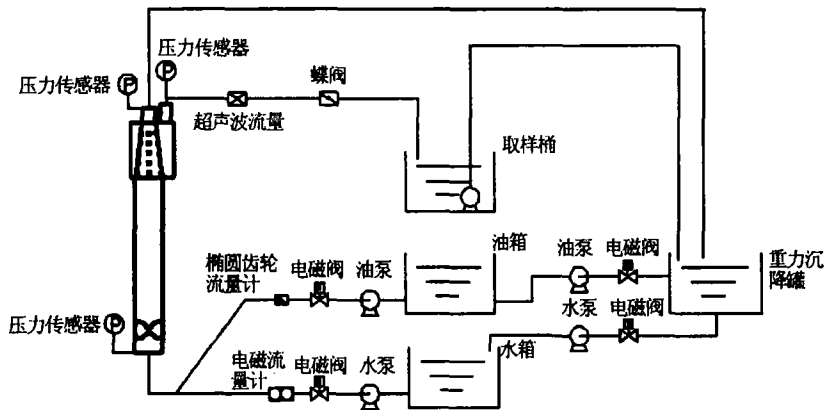


图 3 实验系统流程图

在试验时，试验介质为白油和水，两种介质在试验测试条件下的物性参数如下：

$$\rho_o = 836.0\text{kg/m}^3, \mu_o = 0.105\text{kg/m}\cdot\text{s}, \rho_w = 998.0\text{kg/m}^3, \mu_w = 0.001\text{kg/m}\cdot\text{s}.$$

由于新型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，因此从除水口流出的水中是含有一部分油的，含油越高，回注后对地层的伤害越大。

图 4 显示了在入口流量为  $4.10\text{m}^3/\text{h}$ ，入口含油率为 0.02 时，可以看出，随着分流比增大，从矩形孔流出的水中含油率 (g/L) 高于从圆形孔中流出的。也即利用矩形孔去

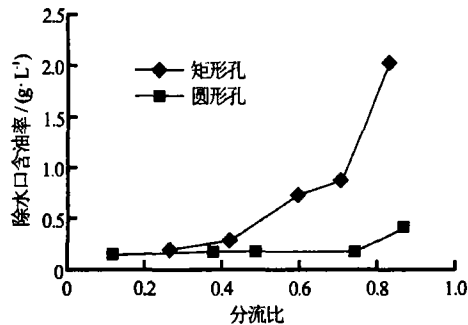


图 4 矩形孔与圆形孔除水效果对比图

除壁面附近的水对流场影响较大，将分布在中心的部分油相从空中流出了，因此，对于除水孔结构，采用圆形孔能够减小对中心油相的干扰，从而降低相同条件下的除水口水中含油率。

#### 4. 2 除水孔形状对分离压降的影响

当入口流量发生变化时，变化分流比，其余工况一致时，从入口到除水口的压降随孔形状变化规律如下图 5，可以发现，压降随分流比的变化趋势都一致，但流过矩形孔的压降普遍大于通过圆形孔所带来的压降。

由于孔的通道长 5mm，圆孔直径  $d_{圆}$  为 3mm，矩形孔的水力直径<sup>[8]</sup>  $d_{矩}$  为：

$$d_{\text{矩}} = \frac{4A}{s} = 6 \quad (2)$$

式中， $A$  为孔的面积， $s$  为孔的周长。

由于孔的通道长度与孔径之比大于 0.5，小于 4，因此孔为短孔。根据前人研究，通过短孔的流量  $q$  与孔面积、通过短孔的压降损失  $\Delta p_{\text{损失}}$  之间的关系为：

$$\Delta p_{\text{损失}} = \frac{\rho}{2C_d^2} \left( \frac{q}{A} \right)^2 \quad (3)$$

式中， $C_d$  为流量系数，一般取 0.82<sup>[9]</sup>， $\rho$  为流体的密度。

假设通过各个孔的流量相等，则：

$$\Delta p_{\text{损失}} = \frac{\rho}{2C_d^2} \left( \frac{Q_c}{nA} \right)^2 \quad (4)$$

由于  $\rho$ 、 $C_d$ 、 $Q_c$  近似相等，因此，将矩形孔和圆形孔的  $n$ 、 $A$  均代入上式，可以发现，通过矩形孔的压降损失大于通过圆形孔的压降损失。

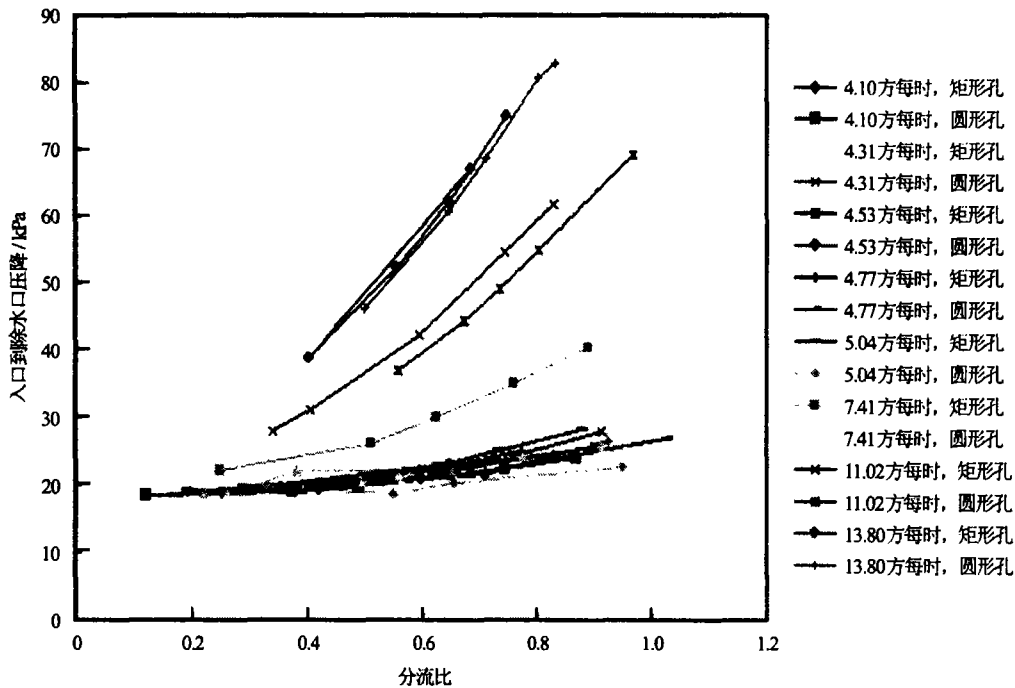


图 5 入口到除水口的压降随孔形状变化规律

## 5 结论

(1) 当入口流量为 10.33m<sup>3</sup>/h,入口含油率为 0.10, 除水口分流比为 0.311 时, 沿壁面切向

开孔方式最好, 所得到的除水口水中含油率最低, 也即在相同工况下, 保持除水口水中含油率一致时, 切向开孔能够回注更多的水。

(2) 在保持所有的除水孔的面积相等, 对于矩形和圆形两种除水孔形状, 减小矩形孔的数目, 当除水口的流量相等时, 通过圆形除水孔的水中含油率更低, 也即圆形除水孔对管道中心区域的油相扰动较小; 当入口流量发生变化时, 变化分流比, 其余工况一致时, 从入口到除水口流过矩形孔的压降普遍大于流过圆形孔所带来的压降。

通过对管道式导流片型油水分离器除水孔结构的实验和数值模拟研究得到, 采用与壁面相切的对称开设圆形除水孔结构, 所得到的除水口水中含油率最低。

## 参 考 文 献

- 1 Larry J Chruseh. Downhole Oil and Water Separation Potential of New Technology Proceedings. Indonesian Petroleum Association Twent fifth Silver Anniversary Convention, 1997-10.
- 2 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, 33(2):78-80.
- 3 Yasser K Bangash, Marcello Reyna. Downhole Oil/Water Separation Systems in High-Volume/High-Horsepower Application. SPE 81123,2004: 48-49.
- 4 John A Veil. 井下油水分离新技术. 国外油田工程, 2001,17(8):22-23.
- 5 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.
- 6 Shi-ying Shi, Ying-xiang Wu, Jun Zhang, J 等. A study on separation performance of a vortex finder in a liquid-liquid cylindrical cyclone. Journal of Hydrodynamics, Ser. B, 2010, 22(5), Supplement 1: 391-397.
- 7 史仕荧, 吴应湘, 马乃庆, 等. 一种管道式导流片型油水分离器研究. 见 第二十三届全国水动力学研讨会暨第十届全国水动力学学术会议文集, 北京: 海洋出版社, 2011:242-251.
- 8 孔珑. 工程流体力学. 北京:水利电力出版社, 1995.
- 9 左健民. 液压与气动技术. 机械工业出版社, 2010.

## Studies about the structure's effect of water-eliminating holes on a vane-type pipe separator for oil-water separation performance

SHI Shi-ying, WU Ying-xiang, XU Jing-yu, LI Hua, LI Dong-hui, MA Nai-qing  
(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190.  
Email: [shishiying123@163.com](mailto:shishiying123@163.com))

**Abstract:** After the initial laboratory experiments, a new vane-type pipe separator for oil-water separation was found to separate oil phase from water phase effectively. But there are many factors

that affect the separation performance in them such the structure of the water-elimilating holes. In order to study the effect of shape and the distribution type of water-elimilating holes on oil-water separation performance in this new vane-type pipe separator, some related laboratory experiments are carried out and a three-dimension numerical simulation by FLUENT about the oil-water separation in them are conducted. The numerical simulation is based on two-phase flow model of MIXTURE and Reynolds Stress Model. From the above researches, the optimal structure of the water-elimilating holes is got which could further optimize the structure of this new vane-type pipe separator for oil-water separation and promote its application in the down-hole oil-water separation system.

**Key words :** Vane-type pipe separator for oil-water separation; Oil-water separation; Water-elimilating hole; Experiment; Numerical simulation.