

文章编号:1005-0329 (2018) 04-0012-06

# 双同向旋流场中液液变质量流动压降特性研究

史仕荧<sup>1</sup>, 梁楚楚<sup>1</sup>, 孟熙然<sup>2</sup>, 邢树宾<sup>1</sup>, 吴应湘<sup>1</sup>, 郑生宏<sup>3</sup>

(1. 中国科学院力学研究所, 北京 100190; 2. 大庆油田有限责任公司第四采油厂, 黑龙江大庆 163511;

3. 中国石油长庆油田分公司设备管理处, 陕西西安 714000)

**摘要:** 轴流式井下旋流油水分离器是一种可用于油井中进行油水分离的新型分离器, 在室内对影响其压降的因素 (入口流量、分流比、含油率等) 进行了试验研究。结果表明, 与压降相关的无量纲参数  $Eu$  主要与  $Re_m$ 、 $F$  和导流片结构有关。当导流片结构一定时,  $Re_m$  为主控参数。采用无量纲参数分析法还得到了压降的计算关系式, 该关系式综合考虑操作参数、物性参数等对压降的影响, 适用范围更广, 为轴流式井下旋流油水分离器在井下应用时的压降预测提供了指导。

**关键词:** 双同向旋流场; 轴流式井下旋流油水分离器; 井下油水分离; 压降

中图分类号: TH137

文献标志码: A

doi:10.3969/j.issn.1005-0329.2018.04.003

## Research on Pressure Drop characteristics of Liquid-liquid Variable Mass Flow in Co-dual Vortex Field

SHI Shi-ying<sup>1</sup>, LIANG Chu-chu<sup>1</sup>, MENG Xi-ran<sup>2</sup>, XING Shu-bin<sup>1</sup>, WU Ying-xiang<sup>1</sup>, ZHENG Sheng-hong<sup>3</sup>

(1. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2. Daqing Oilfield Co., Ltd., Fourth Oil Production Plant, Daqing 163511, China; 3. Equipment Management Department of Changqing Oilfield Company, Xi'an 714000, China)

**Abstract:** Axial downhole hydrocyclone separator is a new type of separator for oil-water separation in oil well. Experiment researches were carried out indoors on the factors that influence its pressure drop such as flow rate, split ratio, oil content and so on. The results show that the dimensionless parameter  $Eu$  related to the pressure drop is mainly correlated with  $Re_m$ ,  $F$  and guide vane structure. When the guide vane structure is determined,  $Re_m$  is the main control parameter. Pressure drop calculation formula is also obtained by dimensionless parameter analysis method. This formula takes into account the effect of operating parameters and physical property parameters on pressure drop, thus has wider range of application, which provide guidance for prediction of pressure drop of the axial downhole hydrocyclone separator for application in downhole.

**Key words:** co-dual vortex field; VTPS (vane type pipe separator); downhole oil-water separation; pressure drop

## 1 前言

多相流动压降特性的研究可以为油气生产和输送等提供理论指导, 是管流研究的重点。目前关于多相流动压降的研究大部分是常规管流中的等质量多相流动, 即流体在研究域的进出口质量流量相等<sup>[1~3]</sup>。对于非常规管流即变质量多相流动的压降研究主要是关于普通管流如井筒中的流动<sup>[4,5]</sup>, 而涉及管道中双同向旋流的变质量流动压降特性研究还很少。

轴流式井下旋流油水分离器 (VTPS) 因结构紧凑、处理量大、分离性能稳定等优点具有良好的应用前景, 可以大幅度降低开采中后期油井的开采

成本<sup>[6~8]</sup>。而当其在井下应用之前, 需要预估其压降从而为配套泵的选择等提供参数, 为油井的开发提供更为科学的理论依据。而 VTPS 中的流动属于双同向旋流场中变质量流动, 因此急需研究其中的压降特性<sup>[9]</sup>。关于旋流器中液液两相变质量流动压降的研究主要有两种方法: 半理论半经验关系式和经验关系法。对于半理论半经验关系法, 目前主要是基于 Bernoulli 方程并进行相应的简化<sup>[10,11]</sup>, 然后通过试验得到相关参数的经验表达式来确定压降。经验关系法主要是通过假设压降与几个因素如入口流量、分流比等有关, 然后通过试验得到它们的关系, 采用这种方法是计算压降的主流方法, 如王尊策、蒋明虎, Martin Thew 等通过试验

收稿日期: 2017-01-24 修稿日期: 2017-05-08

得到入口到底部出口的压降与分流比、入口流量的经验关系<sup>[12~15]</sup>。经验公式与具体的结构参数、物性参数等相关,不具通用性。当 VTPS 应用到井下时,估算入口到出油口的压降从而为配套泵的选择提供参数具有重要意义。鉴于此,本文对双同向旋流的变质量流动压降特性研究采用无量纲参数分析法<sup>[16]</sup>,即通过研究与压降相关的无量纲量以及彼此之间的关系,从而为 VTPS 的井下应用服务。

## 2 试验研究

### 2.1 试验对象

VTPS 结构如图 1 所示,其材料为有机玻璃,导流片的安装角度为 40°,导流片的数目为 3 片。

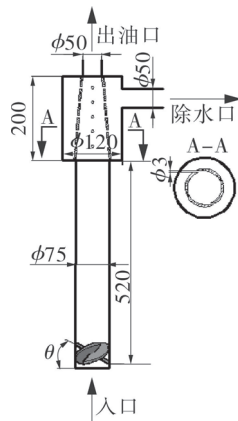


图 1 VTPS 结构尺寸

### 2.2 试验系统

室内试验系统(图 2)由 VTPS、循环系统、控制系统和测量系统组成。循环系统由水罐、油罐、泵、φ 50mm 透明有机玻璃管(除 VTPS 其余部分管路直径)、VTPS、重力沉降分离罐组成;控制系统由控制台、阀组成;测量系统由电磁流量计、腰轮流量计、压力传感器等组成。

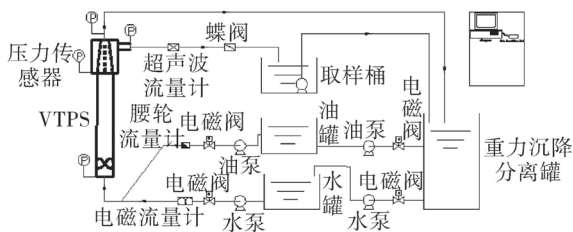


图 2 试验系统结构示意图

### 2.3 试验过程

试验时,通过控制台控制开启管道中的阀门和泵,使油水两相分别由油罐、水罐经过油泵和水

泵输送至 Y 型接头混合进入 VTPS 中,经过导流片导流后,形成旋流场,分布在管壁附近的流体经过锥段上的除水孔进入套管中,由出水口流出,分布在管中心区域的流体继续向前运动进入重力沉降罐中进行沉降分离,并通过相应的泵压回水罐和油罐中,从而实现循环试验。在试验过程中,安装在导流片前、锥段前后、出水口处的压力传感器可测量各点的压力;超声波流量计测量从出水口流出的流量,腰轮流量计、电磁流量计分别计量进入 VTPS 的油水两相流量。

试验在常温下进行,所使用的油为白油,密度在试验条件下为 836 kg/m<sup>3</sup>,动力黏度 215 MPa·s,所使用的水为自来水。鉴于井下油水分离通常应用在高含水期即含水率高于 85%,试验时控制含水率在 15% 以内,试验的流量为整个系统能达到的最大流量。

## 3 试验结果及讨论

### 3.1 参数定义

入口到上部出油口的压降  $\Delta p_U$ :

$$\Delta p_U = p_I - p_U \tag{1}$$

式中  $p_I$ ——入口压力, Pa

$p_U$ ——出油口压力, Pa

分流比  $F$  是 VTPS 的一个重要操作参数,定义如下:

$$F = Q_C / Q_I \tag{2}$$

式中  $Q_C$ ——出水口流量, m<sup>3</sup>/h

$Q_I$ ——入口流量, m<sup>3</sup>/h

入口含油率  $\alpha$  指流经入口的油相体积流量与总体积流量之比,即:

$$\alpha = Q_{IO} / Q_I \tag{3}$$

式中  $Q_{IO}$ ——入口油相体积流量, m<sup>3</sup>/h

### 3.2 双同向旋流场中油水两相变质量流动试验结果分析

#### 3.2.1 压降随分流比变化规律

当入口流量为 4.97 m<sup>3</sup>/h 时,入口含油率为 15% 时,图 3 显示了油水两相在双同向旋流场中变质量流动压降随分流比变化的规律。从图中可以看出,当分流比增大时,从入口到出油口的压降呈减小趋势,该压降等于直管段与锥段的压降之和;其中直管段的压降(锥段前与导流片前的压差)随着分流比变化不大,锥段(锥段前后的压

差) 随分流比的增大逐渐减小。这是由于当分流比增大时, 主要是由流体从锥段开孔流出的流量增大造成的, 而在直管段中的流量是基本不变的, 故直管段的压降基本不变, 而在锥段中从出油口流出的流体量减少, 平均流速降低, 沿程摩擦压降梯度和加速压降梯度等减小, 故压降也降低。

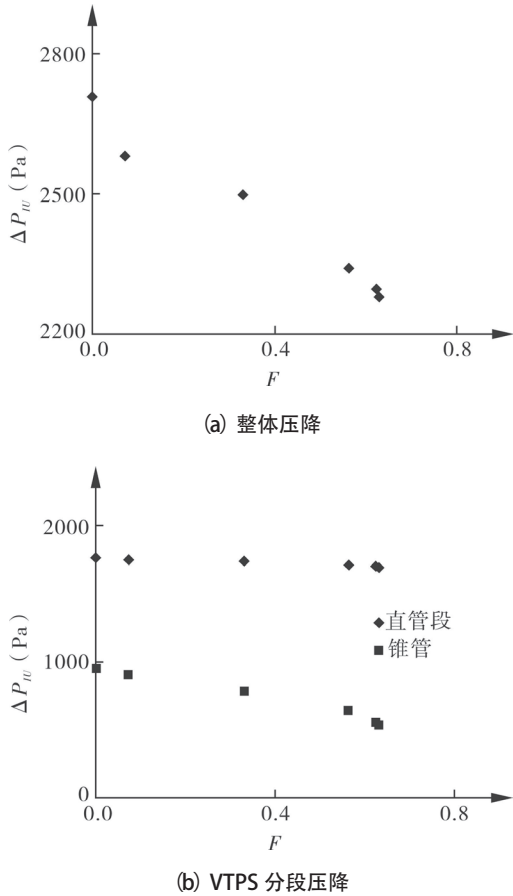


图3 压降随分流比变化规律

3.2.2 压降随入口流量变化规律

当入口含油率为 2% 时, 油水两相在双同向旋流场中变质量流动的压降随入口流量、分流比的变化规律如图 4 所示。从图中可以看出, 随着入口流量的增加, 压降整体增加, 且增加的幅度较大。从图还可以看出, 压降随分流比变化较入口流量变化的幅度要小, 主要原因在于入口工况没有变化, 分流比变化时, 压降变化主要是由锥段流向出油口流量变化造成的; 而当入口流量增大时, 不仅安装导流片的直管段中的压降增加, 而且锥段的压降也增加; 且直管段的长度远大于锥段, 压降更大。故流量变化时压降变化的幅度要远大于分流比变化时带来的压降变化幅度, 即在这种双同向旋流场中液液两相变质量流动压降变化随入口工况变化比分流比更大。

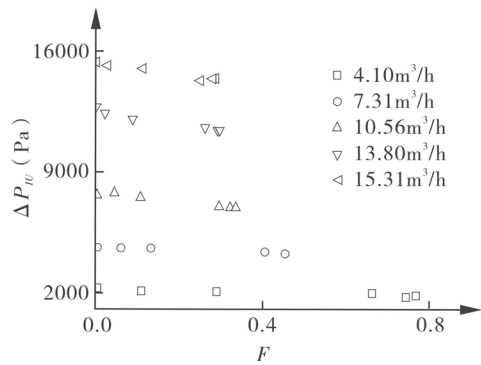


图4 不同入口流量下压降随不同分流比的变化规律

3.2.3 压降随入口含油率的变化规律

当入口流量为 4.10 m<sup>3</sup>/h, 油水两相在双同向旋流场中变质量流动的压降随入口含油率变化的规律如图 5 所示, 可见, 随着含油率的增加, 压降随着含油率的增加而增加, 这是由于随着含油率的增加, 油相和水相之间相互摩擦压降增加。说明在研究旋流器的压降时, 入口含油率对压降也有影响。在前人对于双反向旋流场中压降经验研究中, 通常忽略含油率的影响<sup>[12~14]</sup>。为了考虑含油率的影响, 拟采用的量纲分析法能考虑含油率的因素影响。

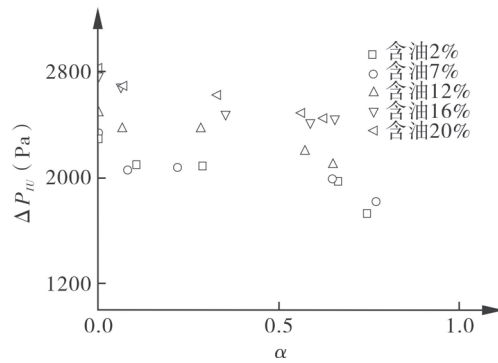


图5 压降随含油率的变化规律

4 试验数据回归

为了得到 VTPS 中双同向旋流场的液液两相变质量流动压降规律, 本文通过量纲分析, 得到无量纲参数关系, 间接计算得到压降。决定 VTPS 入口到上部出油口压降  $\Delta P_{IU}$  的因素主要有: 混合密度  $\rho_m$ , 混合黏度  $\mu_m$ , 混合流速  $V_m$ , 旋流器的主直径  $D$ , 入口含油率  $\alpha$ , 分流比  $F$ 。根据量纲分析的 Buckingham 原理, 建立压降的数学模型<sup>[17]</sup>:

$$\Delta P_{IU} = f(V_m, \mu_m, \rho_m, F, D) \tag{4}$$

其中  $V_m = V_{sw}(1-\alpha) + V_{so}\alpha$

$\rho_m = \rho_w(1-\alpha) + \rho_o\alpha$

式中  $V_{sw}, V_{so}$ ——入口水相、油相的表现流速, m/s

$\rho_w, \rho_o$ ——水相、油相的密度, kg/m<sup>3</sup>

根据量纲分析理论, 选取  $V_m, \rho_m$  和  $D$  为基本量纲, 则可以组成如下的无量纲量:

$$\pi_1 = \frac{\Delta P_{\text{总}}}{0.5\rho_m V_m^2} = Eu \quad (5)$$

$$\pi_2 = \frac{\rho_m D V_m}{\mu_m} = Re_m \quad (6)$$

$$\pi_3 = F \quad (7)$$

式中  $Eu$ ——压力与惯性力之比

$Re_m$ ——惯性力与黏性力之比

根据 Flores 的研究<sup>[18]</sup>, 对于两相环状流中, 混合雷诺数中的混合黏度应取管内连续相的黏度, 导流片型管道式油水分离器中的连续相为水相, 因此:

$$\pi_2 = \frac{\rho_m D V_m}{\mu_c} = Re_m \quad (8)$$

从而得到相应的量纲关系为:

$$Eu = \frac{\Delta P_{\text{总}}}{0.5\rho_m V_m^2} = f_1(Re_m, F) \quad (9)$$

其中  $Re_m = \frac{\rho_m D V_m}{\mu_c}$

#### 4.1 固定导流片结构下的参数关系

对于图 1 的 VTPS 结构, 图 6 和 7 显示了变化入口混合流速、混合密度等得到的  $Eu$  与  $Re_m$ 、 $F$  之间的关系。从图 6 可以看出,  $Eu$  与  $Re_m$  之间近似满足幂指数关系, 从图 7 可以看出, 在不同的  $Re_m$  下,  $Eu$  随入口  $Re_m$  的变化较大; 而在相同的  $Re_m$  下, 随入口  $F$  的变化较小, 且基本上呈线性变化, 因为  $F$  的取值在 0~1 之间, 故  $F$  对  $Eu$  的影响较小。因此, 本文的  $Eu$  与  $Re_m$ 、 $F$  之间的关系采用如下方法进行拟合, 即先拟合出  $Eu$  与  $Re_m$  之间的关系, 最后加上  $Eu$  与  $F$  之间的线性关系进行修正。

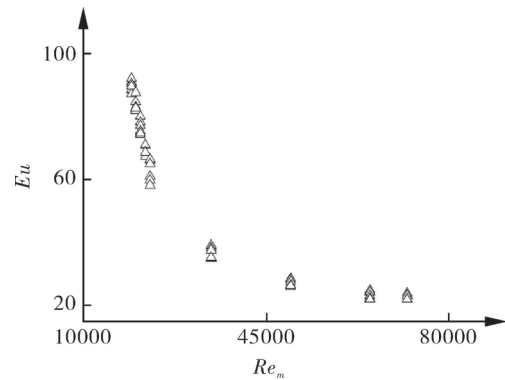


图 6  $Eu$  与  $Re_m$  之间的关系

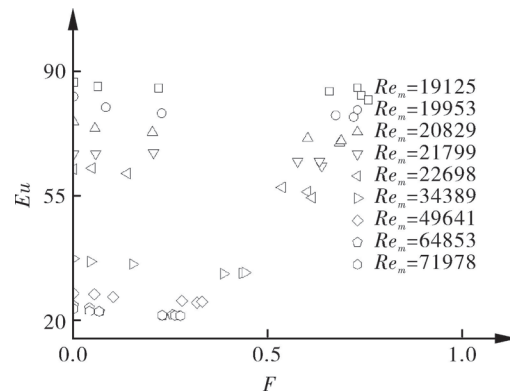


图 7  $Eu$  与  $F$  之间的关系

通过上述研究方法, 得到  $Eu$  与  $Re_m$ 、 $F$  之间的关系满足如下关系式, 拟合的相关度高达 0.98。

$$Eu = ae^{\frac{-Re_m}{b}} - cF + d \quad (10)$$

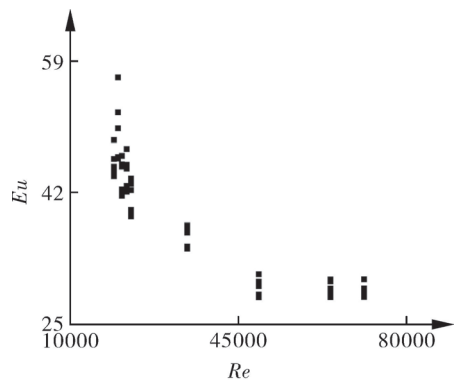
式中  $a=690.93, b=7853.07, c=12.0, d=25.93$ 。

#### 4.2 变导流片结构下的参数关系

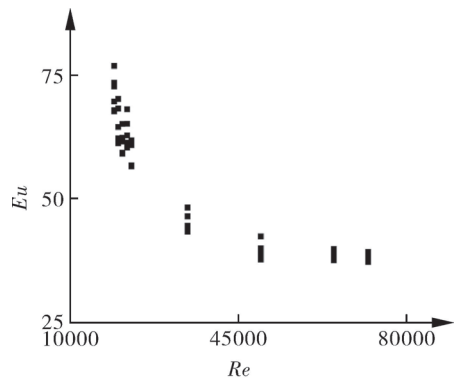
双向同旋流场是由导流片诱导的, 为了研究在导流片结构变化时, 上述无量纲参数之间的关系是否仍然满足, 共加工了 5 种导流片结构, 2 叶片 30°、3 叶片 30°、4 叶片 30°、3 叶片 40°、3 叶片 20°, 并对每个导流片结构开展了相关试验。图 8 为其余导流片的试验情况, 从图可以看出, 在导流片结构发生变化时,  $Eu$  与  $Re$  的分布规律相似。经过研究发现, 均遵循式 (10) 规律, 表 1 为各导流片对应的参数值与相关度, 可以看出, 相关度在 0.95 以上。

表 1 各导流片对应的参数

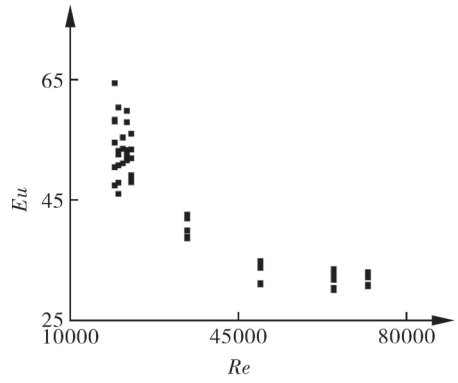
导流片结构	a	b	c	d	$R_2$
3 叶片 20°	1288.58	13562.4	37.03	100.14	0.96
3 叶片 40°	690.93	7853.07	12.0	25.93	0.98
3 叶片 30°	77.48	17642.61	11.3	30.877	0.95
2 叶片 30°	49.57	15301.55	7.2	29.62	0.97
4 叶片 30°	202.94	9381.01	8.70	39.37	0.96



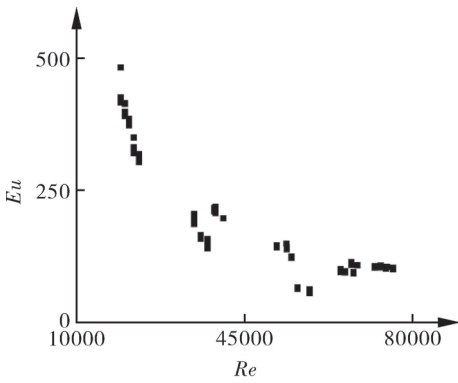
(a) 2叶片30°



(b) 4叶片30°



(c) 3叶片30°



(d) 3叶片20°

图 8 不同导流片结构的无量纲参数之间的关系

通过二次回归得到各参数与导流片结构的关系如下:

$$Eu = h_1 e^{-Re_n / h_2} - h_3 F + h_4 \quad 0 < F < 1 \quad (11)$$

所有的参数 h 均满足如下规律:

$$h = p_1 + p_2 n + p_3 n^2 + p_4 / \theta + p_5 / \theta^2 \quad (12)$$

式中 n——导流片的数目

θ——导流片安装角, °

式 (11)、(12) 说明, 角度越小, 影响越大; 导流片数目越多, 影响越大, 与试验结果的规律相似。在入口工况一致的前提下, 由于导流片角度越小, 流动转向越明显; 导流片数目越多, 流体与导流片摩擦越大, 故与压降相关的 Eu 越大。图 9 是试验值和拟合值的对比, 最大相对误差为 16.0%, 满足工程应用需求, 说明方程式 (10) 可以用来预测 VTPS 的压降。

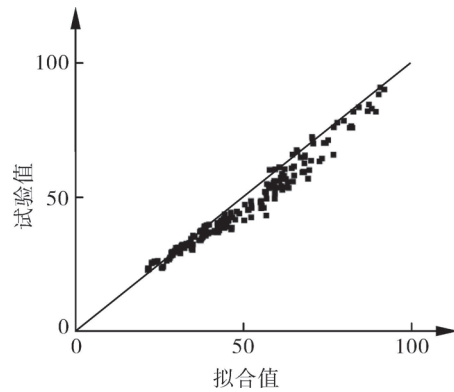


图 9 拟合值和试验值的比较

基于上述研究, 根据某井的处理量、油品性质等参数, 设计了井下油水分离器, 并对其压降进行了预测以指导井下电潜泵的选型, 经过 1 年多的运转, 井下分离器能够有效的将水分离, 且出口口的富油流体能够被电潜泵举升至井口, 证明了本文的研究能够指导实际应用<sup>[19,20]</sup>。

### 5 结语

VTPS 中入口到出油口的压降属于双向同旋流场中液液两相变质量流动的压降问题, 研究得到了其压降随入口流量、分流比、含油率等的变化规律。随着分流比的增加、入口流量的增大, 入口到出油口压降减小; 随含油率增大, 入口到出油口压降增大; 当导流片结构变化时, 随导流片的数目增多、角度减小, 压降增大。通过无量纲分析法,

得到了  $Eu$  与除水孔的结构关系不大, 除水孔主要影响入口到出水口的压降;  $Eu$  主要与  $Re_m$ 、 $F$  和导流片结构有关, 当导流片结构一定时,  $Re_m$  为可控参数, 并得到了无量纲参数之间的关系式 (式 10); 本文采用了无量纲分析法研究双同向旋流场中的变质量流动, 研究结果可以为 VTPS 在井下应用时的压降预测和泵的选择提供参考。

## 参考文献

- [1] Heravi P, Torabi F. A mathematical model for pressure drop of two-phase dry-plug flow in circular mini/micro channels [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2016, 87: 9-15.
- [2] Garimella S, Agarwal A, Killion J. D. Condensation pressure drop in circular microchannels [J]. *Heat Transfer Eng*, 2005 (26) : 28-35.
- [3] Abdulkamil Ajani, Mohan Kelkar, Cem Sarica, et al. Foam flow in vertical gas wells under liquid Critical velocity and pressure drop prediction [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2016 (87) : 124-135.
- [4] 周生田, 张琪, 李明忠, 等. 水平井筒变质量流体流动实验研究 [J]. *石油大学学报 (自然科学版)*, 1998, 22 (5) : 53-55.
- [5] Zhiming Chen, Xinwei Liao, Xiaoliang Zhao, et al. Performance of multiple fractured horizontal wells with consideration of pressure drop within wellbore [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2016 (146) : 677-396.
- [6] 张劲松, 冯叔初. 对井下油水分离和同井回注的认识 [J]. *油气田地面工程*, 2001, 20 (2) : 5-6.
- [7] 徐晓峰, 史仕荧. 轴流式井下旋流油水分离器压降比性能研究 [J]. *中国矿业*, 2015, 24 (8) : 144-147.
- [8] John A Veil, Stan B. DOWS reduce produced water disposal costs [J]. *Oil & Gas Journal*. 1999, 97: 76-85.
- [9] SHI Shi-ying, XU Jing-yu. Studies on flow field in a vane-type pipe separator for oil-water separation [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2015 (60): 208-212.
- [10] 李自立, 冯淑初. 除油旋流器压降比的数学模型 [J]. *化工学报*. 2001, 52 (6) : 485-488.
- [11] Gomez C, Caldentey J, et al. Oil-water separation in liquid-liquid hydrocyclones (LLHC) - Experiment and Modeling [C]. *SPE 71538. Louisiana*, 30 September-3 October, 2001: 1-18.
- [12] 王尊策, 郜冶, 吕凤霞, 等. 液-液水力旋流器入口结构参数对压力特性的影响 [J]. *流体机械*, 2003, 31 (2) : 16-19.
- [13] 刘安生, 蒋明虎, 贺杰, 等. 压降比—液液旋流分离的一个重要性能参数 [J]. *石油矿场机械*, 1997, 26 (1) : 27-29.
- [14] Thew M. Hydrocyclone redesign for liquid-liquid separation [J]. *The Chemical Engineer*, 1986 (7, 8): 17-23.
- [15] 刘晓敏, 蒋明虎. 脱油型静态水力旋流器压力损失测试研究 [J]. *流体机械*, 2004, 32 (12) : 4-6.
- [16] 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]. *水动力学研究与进展*, 2010, 25 (6) : 851-856.
- [17] 易伟, 余斌, 刘秧, 等. 滚石冲击力计算方法研究 [J]. *山地学报*, 2016 (3) : 310-316.
- [18] Flores J. G. Oil-water flow in vertical and deviated wells [D]. *Ph.D. Dissertation. The University of Tulsa*, 1997.
- [19] 颜廷俊, 李增亮, 王旱祥, 等. 电潜泵井下油水分离系统方案设计 [J]. *石油机械*, 2000 (9) : 5-7.
- [20] 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 (3) : 58-61.

作者简介: 史仕荧 (1984-), 女, 助理研究员, 从事油水分离过程机械研究, 通讯地址: 100190 北京市四环西路 15 号 中国科学院力学研究所 LMFS, E-mail: shishiying@imech.ac.cn.

(上接第 17 页)

- [9] 刘丽艳, 冯家祥, 吴皓, 等. 换热器管束排列角对流体力的影响研究 [J]. *压力容器*, 2016, 33 (12) : 13-19.
- [10] 孙亚男, 赵淑芳, 李文香, 等. 不同预冷方式及贮藏温度对采后平菇保鲜效果的影响 [J]. *包装与食品机械*, 2015, 33 (4) : 15-20.
- [11] 刘厚林, 刘东喜, 王勇, 等. 三种空化模型在离心泵空化流计算中的应用评价 [J]. *农业工程学报*, 2012, 28 (16) : 54-59.

作者简介: 孙帅辉 (1984-), 男, 博士, 副教授, 讲师, 主要从事流体机械方面的研究, 通讯地址: 7100048 陕西西安市金花南路 5 号西安理工大学, E-mail: sunsh2004@163.com.