

文章编号: 1001-4888(2017)06-0833-06

# 石油工程中偏心油管内液流失速水击特性分析<sup>\*</sup>

奚斌<sup>1</sup>, 刘扬<sup>2</sup>, 陆伟刚<sup>1</sup>, 周济人<sup>1</sup>

(1. 扬州大学水利与能源动力工程学院, 江苏扬州 225009; 2. 东北石油大学, 黑龙江大庆 163318)

**摘要:** 为了对石油工程中油管偏心时液流失速水击特性进行分析研究, 并给注水、洗井等工艺提供借鉴, 本文利用试验装置, 结合 PIV、瞬态压力测量系统, 对偏心油管内液流失速的流场流线、速度、涡量特性以及压力场特性进行了分析。得出了如下结论: 水击发生时, 随着偏心距的加大, 油管内、外壁压力易产生严重失衡, 油管内液流速度衰减变慢; 油套环内流速随油管内流速衰减而增加; 小流道内流速随偏心距增大而减小; 涡量随偏心距的增加而减小。

**关键词:** 偏心; 油管; 失速; 流场; 压力场; 涡量

**中图分类号:** TB126

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.7520/1001-4888-17-034

## 0 引言

石油工程在洗井、注水等工艺过程中(如油管偏心), 油管内液流由于意外原因(突然停机或机械故障等)失速, 就会产生液流失速水击——液流由高速运动状态突然减速至零速度(或极低速度)。这一现象会引起洗井时清洗下的腐蚀物、杂质等再次堵塞油层, 注水时引起注水井和注水设备的损坏, 产生安全事故, 影响油井的正常运行。目前在偏心环空液体运动规律的研究中, 主要有环形空间轴向流动的流态<sup>[1-8]</sup>方面的研究和液流参数求解方法<sup>[9-16]</sup>方面的研究, 偏心环空液流失速水击的研究尚较为鲜见。由于偏心环空注水、洗井过程中, 有正注(洗)、反注(洗)、合注等多个工艺, 其中合注液流失速又可分为: 油套环空内液流失速、油管内液流失速、油套环空和油管内液流共同失速三种情况。本文仅以注水、洗井过程中偏心油管内液流失速引起的流场、压力场变化为分析对象, 提供有助于石油工程中洗井、注水等工艺的完善和改进, 有助于提升采油过程中管道的安全。

## 1 试验装置及数据采集

油套环空内油管偏心, 会导致环空流道结构发生变化, 液流失速后其流场和压力场会产生新的特性, 为了解其特性, 本文通过试验装置采集了相关数据, 结合 Tecplot 等软件进行了分析研究。

### 1.1 试验装置

根据试验研究需要, 模拟工程实际设计了一套可调节油管在油套环空中偏心距的试验装置, 试验装置流程如图 1 所示。油套环空和油管内液体都可以由注液泵提供液流动力, 在油套环空和油管注液管上各安装了控制阀, 通过支架、储水箱、注水泵、注液管等将油套管系统组成一个自循环模拟系统。环空流道采用直立式, 试验段管长 2000mm, 套管内径 60mm, 外径 70mm, 油管内径 20mm, 外径 25mm, 材质为透明亚克力; 为了便于通过 PIV 对流场进行测试, 在套管外侧中间位置安装了一个方形透明开敞式注水测试盒; 同时为调节偏心距, 上部法兰孔采用腰孔形式, 下部通过四颗套管壁上的可调螺栓进行偏心距控制。中间两个间距 1000mm 的断面上分别安装了测试油套环空内、外壁(外壁不等宽拍摄流道

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2017-02-21; 修回日期: 2017-05-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 51541912); “十二五”国家科技支撑项目资助(2102BAD08B03-2)资助

通讯作者: 奚斌(1968—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事复杂流体流动的研究。Email: wawjxb@126.com

处各安装了一个)、油管内壁压力的数字智能动态压力传感器,测试断面传感器布置图如图 2 所示。

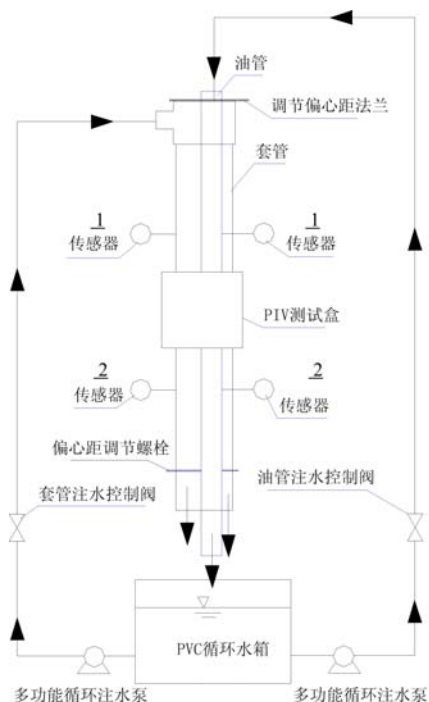


图 1 试验装置流程图

Fig. 1 Chart of experimental process

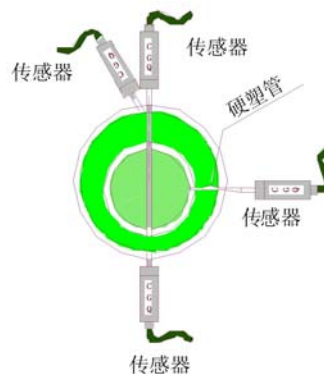


图 2 测试断面传感器布置图

Fig. 2 Chart of the test section sensor

## 1.2 数据采集

试验以合注形式进行,试验温度  $20^{\circ}\text{C}$ 。试验时依次调节油管位置,形成偏心距为 0mm、3mm、6mm、9mm(对应的偏心度为 0、0.1714、0.3429、0.5143)四个工况进行数据采集(见表 1)。

表 1 试验工况一览表

Tab. 1 List of test conditions

| 工况序号 | 偏心距(mm) | 偏心度    | 测试参数  | 分析参数         |
|------|---------|--------|-------|--------------|
| 1    | 0       | 0      | 压力、流场 | 压力场、流线、流速、涡量 |
| 2    | 3       | 0.1714 | 压力、流场 | 压力场、流线、流速、涡量 |
| 3    | 6       | 0.3429 | 压力、流场 | 压力场、流线、流速、涡量 |
| 4    | 9       | 0.5143 | 压力、流场 | 压力场、流线、流速、涡量 |

试验中为获得偏心环空大、小拍摄窗口(大、小流道)的失速水击压力,在油套环空的小间隙处环空内、外壁均安装了传感器,大间隙处仅外壁安装了传感器,并将所有传感器接线按序连接到智能集线器上,并将集线器与安装好采集程序的电脑和电源连接,为了保证传感器连接正确,在测试前对传感器进行调试,保证其安装正确可靠。

将 PIV 专用方形透明测试盒内注入一定深度的纯净的无色水,安装连接好激光器、同步器等,将激光器产生的片光源对准测试断面,调整好 CCD 相机的位置,设置 PIV 相应测试参数,使测试断面粒子图像清晰地呈现在电脑屏幕上,测试过程中保持相机和激光器光源的稳定,不产生震动位移。

试验时,调节好油管在油套环空中的偏心距,按照合注的方式,启动注水泵,排出流道中气体,形成稳定的注水形式,通过注水管道上的注水阀控制注水量,油套管底部箱体排水阀打开,水流流入 PVC 循环水箱,注水过程循环稳定。水流在环空流道中做循环流动时,通过突然断电或突然速关注水阀,形成油管内液流失速水击现象。同一瞬时通过电脑预先安装好的程序,采集环空流道测试断面压力参数随时间变化的参数,并通过 PIV 采集环空流道液流失速时流场随时间的变化情况。

试验中采集的数据有流场特性参数和压力场特性参数。流场参数采用适宜液流失速水击流场瞬变

特征的 PIV 获得,此技术可以获得拍摄视场内液流流动的整个信息,通过相关软件提取分析需要的实时数据;压力场数据采用高频动态智能传感器系统采集,此系统可以通过计算机迅速同时采集间隔 1ms 的多点压力信号,适合液流失速水击压力变化快、历时短的特点。

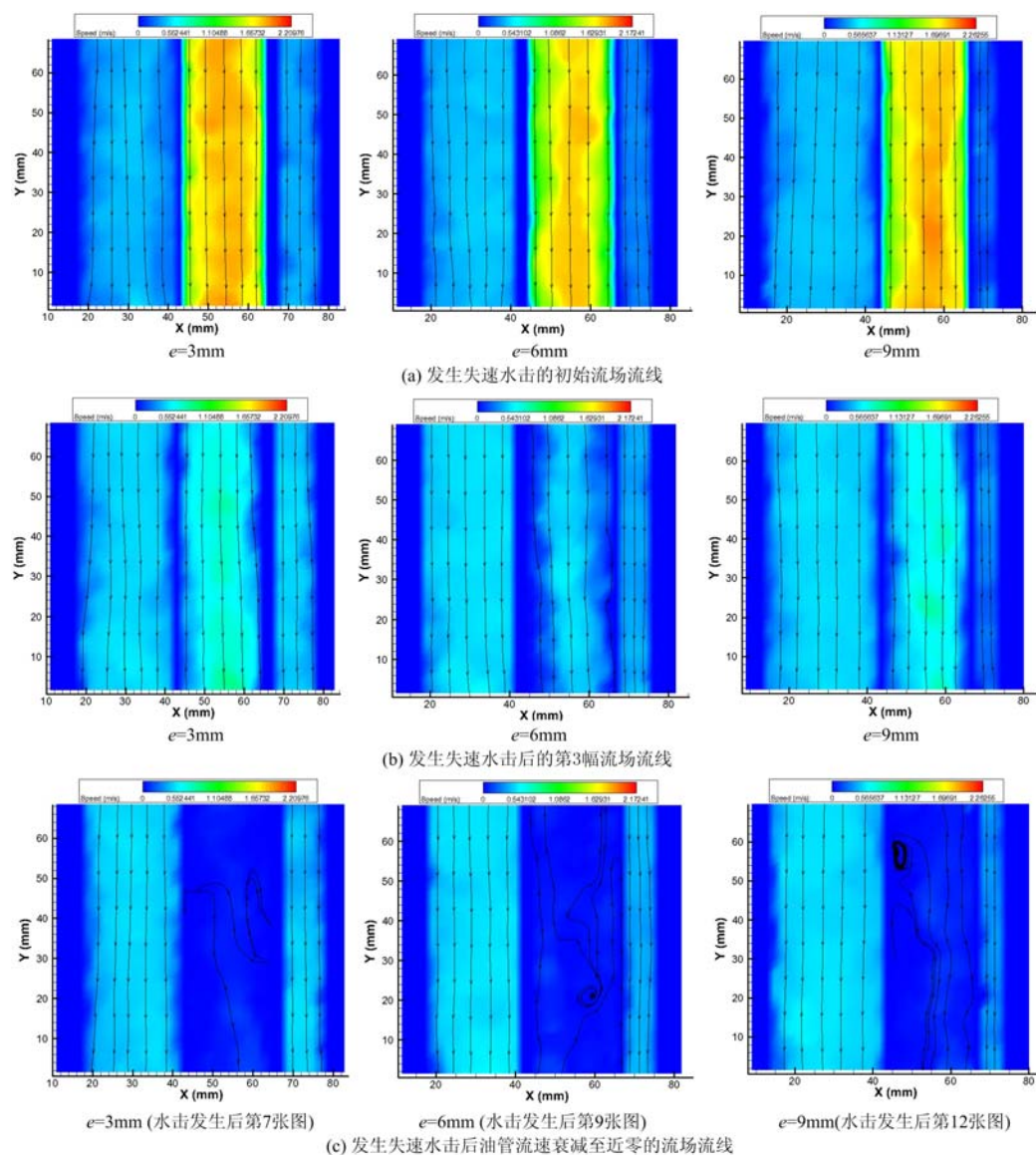


图3 不同偏心距油管内液流失速流场流线图

Fig. 3 The flow field streamline of tubing with different eccentricity

## 2 偏心油管内液流失速水击流场特性

### 2.1 偏心油管内液流失速水击流场流线特性

根据试验采集数据,通过 Tecplot 软件对不同偏心距流场流线进行了显示,从每个工况 500 组图片中找出失速水击开始发生的流场流线图,以及失速水击发生后的第 3 张流场流速图和油管内流速衰减近零时的流场流速图,组成图 3,用来分析油管内液体产生失速水击时的流场流线特性。从图中可以看出,油管内液流失速水击发生后,第 3 幅图前流场流线没有因偏心距不同而产生明显不同的特征,但在所做的试验中发现 3mm 偏心距油管内速度在水击发生后第 7 张图中衰减近零,6mm 偏心距油管内速度在水击发生后第 9 张图中衰减近零,9mm 偏心距油管内速度在水击发生后第 12 张图中衰减近零,排除失速水击波速差别的影响,偏心距越大使得油管内液流流速衰减越慢。这是由于合注时油套环空和油管是连通的,偏心距越大油套环空横向流速越快,对油管内液流水击流速的抑制降低。油套环空内液

流速度在油管内失速水击发生时有加大的趋势,这是合注液流边界形式和油管内失速水击发生时压力变化耦合效应产生的。

## 2.2 偏心油管内液流失速水击流场速度特性

根据 PIV 试验采集的试验数据,通过软件提取了三个不同偏心距油管内液流失速产生水击后的  $Y=40\text{mm}$  拍摄窗口断面的径向流速分布图,如图 4 所示。

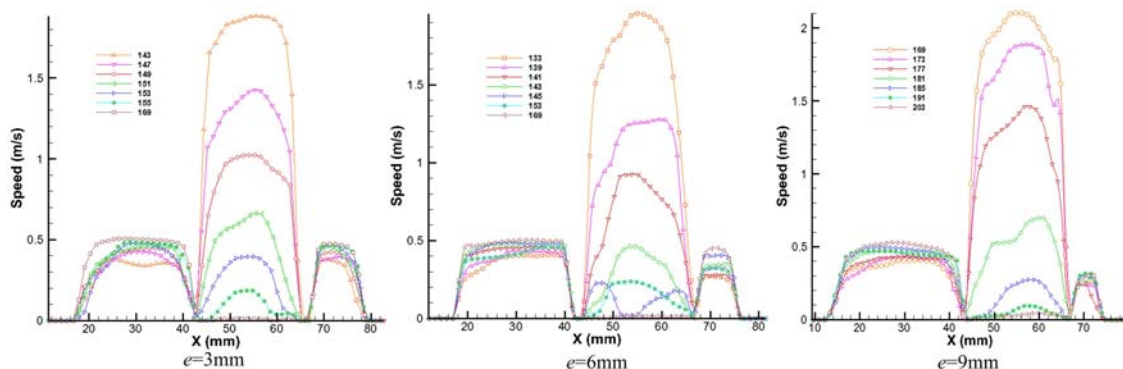


图 4 不同偏心距油管内液流失速  $Y=40\text{mm}$  断面径向流速分布图

Fig. 4 Radial velocity distribution at section  $Y=40\text{mm}$  in tubing with different eccentricity

由图 4 可以看出,偏心距越大,小流道内流速越小;油管内失速水击发生后,油套环空内流速随油管内流速的衰减而增加,小流道内流速增幅随偏心距增大而减小。这主要是由环空液流流动的边界摩擦阻和油管内液流失速水击压力变化共同作用产生的,油套环空内流速增加在油管内水击消失后结束,流速也趋于稳定。

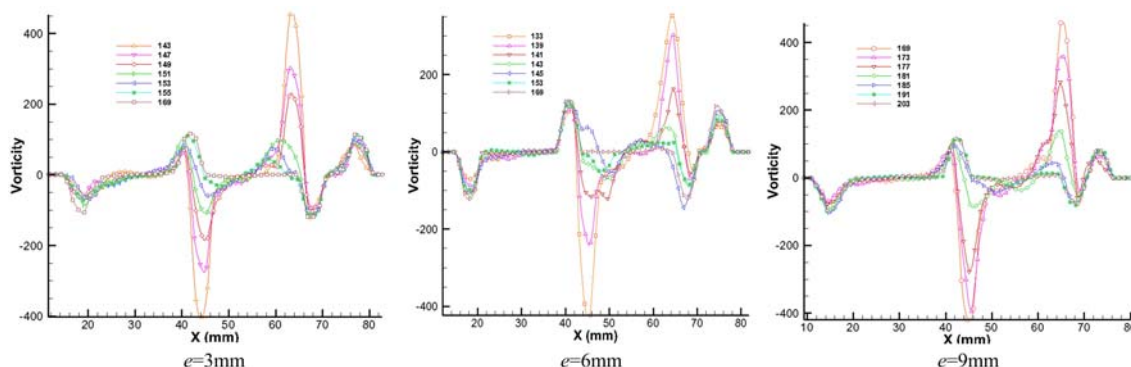


图 5 不同偏心距油管内液流失速  $Y=40\text{mm}$  断面涡量分布图

Fig. 5 Vorticity distribution at section  $Y=40\text{mm}$  in tubing with different eccentricity

## 2.3 偏心油管内液流失速水击涡量场特性

为了研究不同偏心度油管内液流失速产生水击的涡量场特性,用 PIV 各拍摄了 500 张偏心距为 3mm、6mm、9mm 的失速水击流场图,经 Tecplot 软件处理得出各偏心距的涡量场图,为研究径向断面涡量随  $X$  轴坐标的变化,在各偏心距的涡量图中,取出失速水击发生时不同时刻的 7 幅图中  $Y=40\text{mm}$  径向断面的涡量,并分别置于同一坐标系,如图 5 所示。由图可知,偏心油管内液流失速,油管内贴壁涡量变化剧烈,随着水击的消失,涡量趋于零,也就是流体微团的转动随水击的衰减而减小,这与水击能量的变化相符,贴壁流体微团剧烈的转动是水击能量衰减和壁面摩擦形成的主要成因。随着偏心距的加大,油管内贴壁涡量的衰减要平缓些,油套环空内涡量随偏心距的增加而减小,这是由于油套环空内流体微团的转动产生贴壁摩擦,使断面流速减小。涡量的贴壁性也是环空内流速抛物线分布的成因。

## 3 偏心油管液流失速水击压力场特性

根据合注偏心油管内液流失速水击特性研究的需要,利用动态压力采集系统,分别采集了不同偏心

距工况下,油管内液流失速水击的压力场参数,通过软件提取了装置上 1-1 断面(如图 1)环空外壁大小流道、环空内壁小流道、油管内壁四个测点处的失速水击的压力值,并将发生水击时各偏心距 1-1 断面上四个测点的水击压力随时间的变化绘制在同一坐标系内,如图 6 所示。

由图 6 可以看到,随着偏心距的加大,油管内压力的衰减变化加剧,在 9mm 偏心距,油管内压力剧烈高频震荡衰减;偏心距较小时,油管内的失速水击压力小于油套环空内;测试数据显示偏心距加大,油管壁面压力随时间剧烈震荡变化,油管壁面失速水击压力和油套环空壁面水击压力差值增大,震荡变化频次增多,历时也增加;油套环空内壁水击压力与外壁水击压力不等,差值随偏心距增大而变化。外壁水击压力,测试窗口大、小流道处两测点值几近相等,这一特征随偏心距的变化不明显。

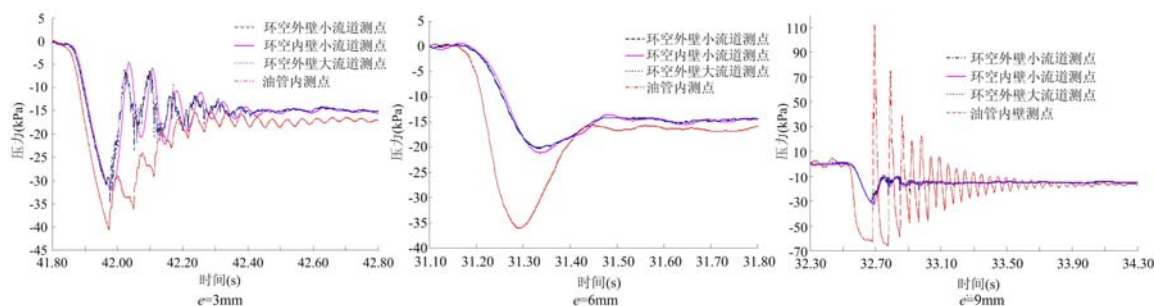


图 6 不同偏心距油管内液流失速 1-1 断面水击压力随时间变化图

Fig. 6 Water hammer pressure distribution with time at section 1-1 in tubing with different eccentricity

## 4 结论

(1) 油管内液流失速产生水击,随着偏心距的加大,环空内、外壁和油管内测点水击压力变化趋剧烈,油管内、外壁压力差值增大,即油管内、外壁压力产生严重失衡。

(2) 油管内液流失速产生水击,偏心距越大,油管内液流流速衰减越慢;油套环空内流速随油管内流速衰减而增加,小流道内流速随偏心距增大而减小;油套环空内流速增加随油管内水击消失而结束,流速趋于稳定;涡量随偏心距的增加而趋于平缓,并减小。

(3) 偏心环空液流失速产生水击,其水击压力除受断面能量变化、速度衰减的压力涡流影响外,还受到由于油管偏心产生的二次流影响,表现在失速水击发生后,油管外壁(油套环空因油管偏心产生大、小流道的两侧)两侧压力的失衡,随偏心距加大,二次流会引起这一“失衡”现象加剧。

## 参考文献:

- [1] 崔海清, 刘希圣. Power-law 流体偏心环空螺旋流中的二次流问题[J]. 水动力学研究与进展(A 辑), 1995, 10(6):610—620 (CUI Haiqing, LIU Xisheng, On the secondary flow in the helical flow of the power-law fluids in eccentric annuli[J]. Journal of Hydrodynamics(A), 1995, 10(6):610—620 (in Chinese))
- [2] Yang Zidong, Liu Junying. Numerical analysis of laminar viscous Non-Newtonian liquids flows in an eccentric annuli[C]. Proceedings of the Forth International Conference on Fluid Mechanics, 2004:452—456.
- [3] Baris S. Unsteady flows of a binary mixture of incompressible Newtonian fluids in annulus[J]. International Journal of Engineering Science, 2005, 43(19-20):1471—1485.
- [4] Mirzazadeh M, Escudier M, Hashemabadi S. Purely tangential flow of a PTT-viscoelastic fluid within a concentric annulus[J]. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 2005, 12(9):88—97.
- [5] 奚斌, 刘扬, 韩洪升, 等. 环空流道液流失速水击特性及其成因的研究[J]. 实验力学, 2014, 29(6):769—778 (XI Bin, LIU Yang, HAN Hongsheng, et al. Study of the flow stall water hammer characteristics in an annulus flow channel[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2014, 29(6):769—778 (in Chinese))
- [6] Yurusoy M, Yilbas B, Pakdemirli M. Non-Newtonian fluid flow in annular pipes and entropy generation: temperature-dependent viscosity[J]. Sadhana, 2006, 31(6):683—695.
- [7] 邢均, 韩雪松, 韩廷凯, 等. 偏心环空螺旋流的 PIV 测试研究[J]. 海洋石油, 2009, 29(3):107—112 (XING Jun, HAN Xuesong, HAN Tingkai, et al. Experimental study on the helical flow in eccentric annulus with PIV

- technology[J]. Offshore Oil, 2009, 29(3):107—112 (in Chinese))
- [ 8 ] Ravanchi M, Mirzazadeh M, Rashidi F. Flow of Giesekus viscoelastic fluid in aconcentric annulus with inner cylinder rotation[J]. Heat and Fluid Flow, 2007, 28(4):838—845.
- [ 9 ] Tong Dengke, Wang Ruihe, Yang Heshan. Exact solutions for the flow of Non-Newtonian fluid with fractional derivative in an annular pipe[J]. Science in China, Series G: Physics Astronomy, 2008, 48(4):485—495.
- [10] 奚斌, 韩洪升, 刘扬, 等. 环形断面管道水击波速公式推导及其摩阻损失分析[J]. 应用数学和力学, 2013, 34(9):908—916 (XI Bin, HAN Hongsheng, LIU Yang, et al. Analysis of water-hammer wave speed and friction loss in annular space[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2013, 34(9):908—916 (in Chinese))
- [11] 王小兵, 韩洪升, 崔海清, 等. 基于粒子图像测速技术的垂直管中螺旋流的研究[J]. 石油学报, 2009, 30(4):625—629 (WANG Xiaobing, HAN Hongsheng, CUI Haiqing, et al. Study on spiral flow in vertical pipe using the particle image velocimetry[J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(4):625—629 (in Chinese))
- [12] 蒋世全. 幂律流体偏心环空间隙雷诺数及层流区域计算方法研究[J]. 中国海上油气, 2009, 21(3):186—189 (JIANG Shiquan. The study of eccentric annular clearance Reynolds number and laminar flow zone calculation methods for power law fluid[J]. China Offshore Oil and Gas, 2009, 21(3):186—189 (in Chinese))
- [13] 张海桥, 吴继周. Non-Newtonian 流体偏心环空螺旋流的解析解[J]. 应用数学和力学, 1994, 15(7):627—638 (ZHANG Haiqiao, WU Jizhou. Analytical solutions of the helical flow of Non-Newtonian fluid in eccentric annular space[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 1994, 15(7):627—638 (in Chinese))
- [14] 蔡萌. 幂律流体偏心环空螺旋流压力梯度的数值计算[J]. 石油钻采工艺, 2010, 32(2):11—14 (CAI Meng. Numerical calculation of pressure gradient of helical flow of power-law fluid in eccentric annulus[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2010, 32(2):11—14 (in Chinese))
- [15] 季海军, 张新, 崔海清, 等. 流体在内外管同时旋转的偏心环空中螺旋流的稳定性参数[J]. 大庆石油学院学报, 2005, 29(4):16—18 (JI Haijun, ZHANG Xin, CUI Haiqing, et al. Stability parameter of Newton helical flow in eccentric annuli with the inner and outer cylinders rotating simultaneously[J]. Journal of Daqing Petroleum Institute, 2005, 29(4):16—18 (in Chinese))
- [16] 刘巨保, 张强, 罗敏. 油管内偏心抽油杆下冲程阻尼系数研究[J]. 石油矿场机械, 2008, 37(1):1—5 (LIU Jubao, ZHANG Qiang, LUO Min. Study on the down-stroke damping factor of eccentric rod string in Oil tube [J]. Oil Field Equipment, 2008, 37(1):1—5 (in Chinese))

## Analysis of Water Hammer Characteristics of Fluid Flow Stall in Eccentric Tubing used in Petroleum Engineering

XI Bin<sup>1</sup>, LIU Yang<sup>2</sup>, LU Wei-gang<sup>1</sup>, ZHOU Ji-ren<sup>1</sup>

(1. College of Hydraulic Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China;

2. Northeast University of Petroleum, Daqing 163318, China)

**Abstract:** In order to analyze the water hammer characteristics of fluid flow stall in eccentric tubing used in petroleum engineering, and to provide reference for waterflooding, well washing technology etc, in this paper, the flow field streamline, velocity, vorticity and pressure field characteristics of fluid flow stall in eccentric tubing are analyzed by means of experimental device combined with PIV and transient pressure measurement system. Results show that when water hammer occurs, with the increase of eccentricity, the pressures of inner and outer tube wall are seriously unbalanced, and the velocity of liquid flow in tube decreases slowly; the flow velocity in oil collar increases with the decrease of flow velocity in tube; the flow velocity in small passage decreases with the increase of eccentricity; the vorticity decreases with the increase of eccentricity.

**Keywords:** eccentric; oil tube; stall; flow field; pressure field; vorticity