

# S型柔性立管内空气-水两相流流型特征的实验研究

李乃良<sup>1</sup>, 李文升<sup>1</sup>, 郭烈锦<sup>1</sup>, 崔嵘<sup>2</sup>, 张西迎<sup>2</sup>

(1. 西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 710049, 西安;

2. 中海石油(中国)有限公司湛江分公司, 524000, 广东湛江)

**摘要:** 实验研究了S型柔性立管内空气-水两相流流型特征. 实验环路由长114 m的水平环道, 16 m的 $-2^\circ$ 下倾管和高15.3 m、长24 m的S型立管组成, 环路内径为50 mm. 使用立管底部压力、立管出口持液率 $H_L$ 及其概率密度函数(PDF)分布特征识别和区分流型. 实验发现了典型严重段塞流、过渡型严重段塞流、稳定流动3类流型. 典型严重段塞流下 $H_L$ 曲线呈方波状, 相应的PDF分布呈 $H_L$ 分别为0和1的双峰结构; 过渡型严重段塞流下 $H_L$ 曲线呈针刺状, 其PDF分布也为双峰结构, 但 $H_L$ 的低峰远高于 $H_L$ 的高峰; 稳定流动下的PDF分布呈 $H_L$ 为0.27左右的单峰状. 分析表明, 典型和过渡型严重段塞流分别与垂直上升管弹状流和块状流具有相似的PDF分布特征, 但彼此的流动形态却完全不同.

**关键词:** S型柔性立管; 严重段塞流; 流型; PDF分布

**中图分类号:** O359 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2011)07-0100-06

## Experimental Study on Flow Patterns of Air-Water Two-Phase Flow in S-Shaped Flexible Riser

LI Nailiang<sup>1</sup>, LI Wensheng<sup>1</sup>, GUO Liejin<sup>1</sup>, CUI Rong<sup>2</sup>, ZHANG Xiying<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. CNOOC Ltd, Zhanjiang, Guangdong 524000, China)

**Abstract:** Air-water two-phase flow patterns in an S-shaped flexible riser were experimentally studied. The test loop consisted of a horizontal pipeline 114 m in length and 50 mm in i. d., a  $-2^\circ$  downward inclined pipe 16 m in length, and an S-shaped riser 15.3 m in vertical height and 24 m in length. The pressure at the bottom of the riser, the riser outlet liquid holdup  $H_L$  and the probability density function(PDF) distribution were adopted in the identification of the flow patterns. The experimental results show that there were three types of flow patterns in the flexible riser, i. e., typical severe slugging, transitional severe slugging, and stable flow. For the typical severe slugging, the square shape profile of  $H_L$  exhibited a PDF distribution with two peaks at  $H_L=0$  and  $H_L=1$ , respectively; the acicular shape profile of  $H_L$  for transitional severe slugging also had a bimodal PDF distribution, but the peak at high  $H_L$  was much lower than that at low  $H_L$ ; the PDF of  $H_L$  for stable flow displayed a unimodal distribution with a single peak at  $H_L \sim 0.27$ . In addition, the analysis shows that the PDF distributions for typical severe slugging and transitional severe slugging are similar to those for slug flow and churn flow in an upward vertical pipe, respectively, but the flow behavior is totally different from each other.

**Keywords:** S-shaped flexible riser; severe slugging; flow pattern; PDF distribution

收稿日期: 2010-12-20. 作者简介: 李乃良(1983-),男,博士生;郭烈锦(联系人),男,教授,博士生导师. 基金项目: 国家科技重大专项资助项目(2008ZX05026-004-002);优秀国家重点实验室专项基金资助项目(50823002).

网络出版时间: 2011-05-03

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20110503.1037.003.html>

在海洋石油工业中,立管系统是用于将海底原油及伴生气混合物举升到海上平台的重要设备.由于海底管道一般是直接铺设在海床表面上的,会随地形有所起伏,当气液流速较低时,立管中会出现严重段塞流现象.严重段塞流是一种极为有害的流型,它不仅会引起管内压力及出口流量产生大幅波动,导致气液分离效率降低,加剧对下游设备的冲击,还会引起管道发生剧烈的振动,并加剧管内腐蚀.

1973年,Yocum<sup>[1]</sup>最早报道了严重段塞流现象,此后有很多学者<sup>[2-9]</sup>对其特性展开了深入的研究,但这些研究都是基于垂直立管系统的.Tin等<sup>[10]</sup>最先报道了柔性立管严重段塞流特性,认为柔性立管严重段塞流的压力变化特征不同于垂直立管.然而,Montgomery等<sup>[11]</sup>以及Mokhatab<sup>[12]</sup>的研究则指出,柔性立管与垂直立管中严重段塞流具有相似的特性,每个周期都可以划分为4个阶段:积液、排液、气液喷发和液体回落.可见,由于相关研究开展得不够充分,对柔性立管内的气液两相流流型,尤其是严重段塞流特性的认识还存在分歧.由于海洋平台尤其是深水海洋平台常采用S型柔性立管,对柔性立管内的流型特征进行深入的研究具有极为重要的意义.

本文在大型集输-S型柔性立管实验环路上系统研究了柔性立管内空气-水两相流流型,细致分析了各种典型流型下的立管底部压力及出口持液率特征,以深入掌握柔性立管中各种流型的特征规律.

## 1 实验系统

实验是在西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室大型实验装置上完成的.该系统主要由油、气、水储存和供给装置,流量测量设备,实验段及气

液和液液分离器组成(图1).

实验环路由长为114 m的水平环道、16 m的-2°下倾段,以及柔性立管组成,环路内径均为50 mm.柔性立管的结构呈缓S型,总长24 m,垂直高度为15.3 m,其中第1段立管高6.9 m,第2段立管高13.1 m,具体结构见图2.水平和下倾管道均用不锈钢管制成,柔性立管材料采用透明软管,以便可视化观察.在立管出口处安装了一个 $\gamma$ 射线密度计,用于持液率 $H_L$ 的测量.管内压力由瑞士Keller公司生产的PAA23绝对压力传感器(精度0.1级)测量.所有实验数据均由美国NI公司的PCI-6255高速数据采集板采集,采样频率为200 Hz.

实验工质为气液两相,分别采用空气和自来水,油相的供给和测量装置在本实验中未使用.水由离心水泵提供,其流量由电磁流量计计量;空气由螺杆压缩机提供,经稳压罐稳定后,由孔板流量计计量.气液两相经混合器混合后进入实验段进行测试,在出口处经气液分离器分离后,气相被排空,液相流回水箱循环利用.

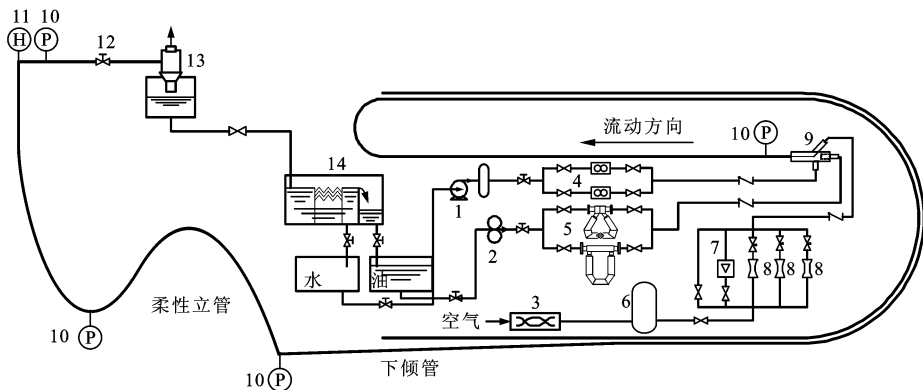
## 2 数据处理方法

对立管内流型进行分类的直观依据是立管底部下壁面静压力及立管出口持液率的变化特征.为便于数据处理和分析起见,将 $\gamma$ 射线密度计采集的信号按照下式作标准化处理

$$H_L = \frac{\rho - \rho_G}{\rho_L - \rho_G} \quad (1)$$

处理后的 $H_L$ 在0~1之间变化, $H_L$ 为0代表全气相, $H_L$ 为1代表全液相.

管内持液率的概率密度函数(PDF)是表征流型的重要手段<sup>[13]</sup>,本文将持液率的PDF分布作为流



1:离心泵;2:齿轮油泵;3:压缩机;4:电磁流量计;5:质量流量计;6:稳压罐;7:涡街流量计;8:孔板流量计;9:气液混合器;  
10:压力传感器;11:射线密度计;12:电动球阀;13:气液分离器;14:油水分离器

图1 实验系统示意图

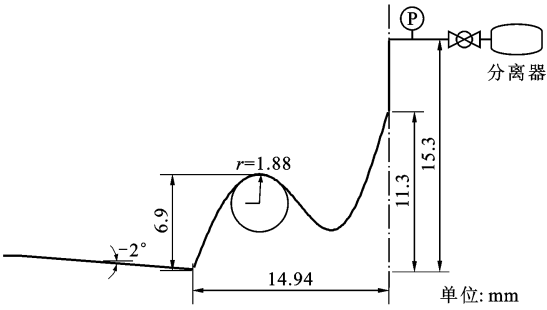


图 2 柔性立管实验段

型分类的另一个重要依据. PDF 描述了离散随机信号的概率,如果在区间 $[x-g\Delta x/2,x+\Delta x/2]$ 内  $H_L$  的总数为  $n$ ,则立管出口  $H_L$  的概率密度函数  $f_{PDF,H_L}$  可按下式计算

$$f_{PDF,H_L}(x)=\lim_{\Delta x\rightarrow 0}\frac{1}{\Delta x}\left(\frac{n}{N}\right)\tag{2}$$

3 结果分析

实验表明,S 型柔性立管中出现的流型可划分为 3 大类,即典型严重段塞流、过渡型严重段塞流、稳定流动. 对 3 类流型各自的特征描述如下.

3.1 典型严重段塞流

Pots 等<sup>[3]</sup>指出,发生严重段塞流的必要条件之一是上升管内液体积聚造成的压力上升速度大于集输管路中因上游输入气体造成的压力上升速度. 典型严重段塞流发生在气液流量较小的范围内,这是一种周期性非常强烈的流型,其周期由 4 个阶段组成,即液塞生长、液塞排出、气体进入立管、液体回落.

在液塞生长阶段,由于立管底部被回流液体堵塞,入口来流液体会使立管内的液位高度不断增加,立管底部压力随之持续升高(图 3),与此同时,封闭在下倾管内的气体的压力也在持续升高.

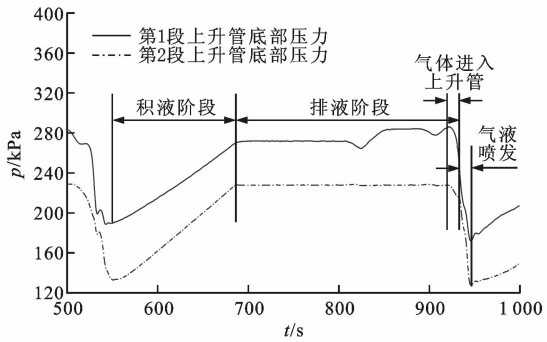


图 3 典型严重段塞流下两段立管的底部压力

当液塞头部到达立管顶部时,便进入液塞排出阶段,由于此时立管内的液位高度不再变化,立管底部压力维持其最大值不变,而下倾管内的封闭气体的压力仍然在不断升高.

当下倾管内封闭气体的压力足够高时,气体便会进入立管. 与垂直立管不同的是,S 型柔性立管中气体是分两次先后进入第 1 段立管的. 首先,小气泡的进入会导致第 1 段上升管底部压力先降低后回升,气塞在第 1 段立管内向上运动,进入到 S 型立管的下降段,使其内压力升高,由于气泡未进入第 2 段上升管,其底部压力不会变化;随后,大股气塞从第 1 段立管底部进入立管,将立管内的液塞快速推出,导致立管底部压力急剧降低,整个过程历时极短.

随着能量的不断释放,当气体能量不足以维持立管内液塞时,在重力的作用下,液体回落并积聚在立管底部,典型严重段塞流进入下一个周期.

在积液阶段和液体回落阶段均无液塞排出,而液体主要在排液阶段排出,因此  $H_L$  曲线呈方波状(图 4),其相应的 PDF 分布呈  $H_L$  分别为 0 的 1 和双峰结构(图 5).

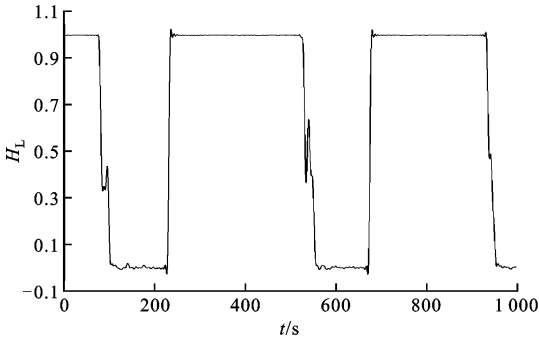


图 4 典型严重段塞流下立管出口持液率特征

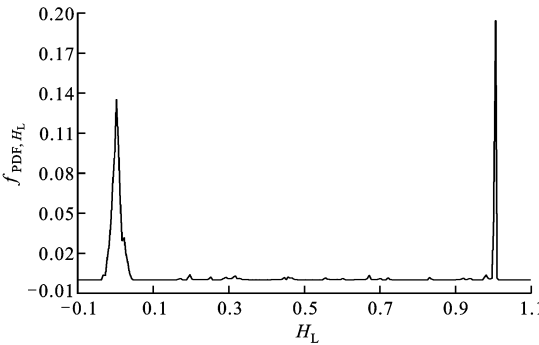


图 5 典型严重段塞流下立管出口持液率的 PDF 分布

值得注意的是,大量关于垂直上升管气液两相流型的研究表明<sup>[13]</sup>,弹状流流型下管内持液率的

PDF 分布亦呈双峰结构,然而其流动形态却与本文观察到的典型严重段塞流完全不同.

3.2 过渡型严重段塞流

增加流速会提高下倾管内封闭气体压力上升速度,当上升管内液体积聚造成的压力上升速度小于集输管路中因上游输入气体造成的压力上升速度时,典型严重段塞流消失,过渡型严重段塞流形成.

过渡型严重段塞流也具有非常明显的周期性特征,但与典型严重段塞流不同的是,其周期主要由积液阶段、气体进入上升管阶段和气液喷发阶段组成,而没有稳定的排液阶段,如图 6 所示.

由于入口气体流量较大,下倾管内封闭气体的压力快速升高,以致于在液塞头部尚未生长到立管顶部时,下倾管内的气塞便进入立管,并推动其内的液塞迅速涌出立管.

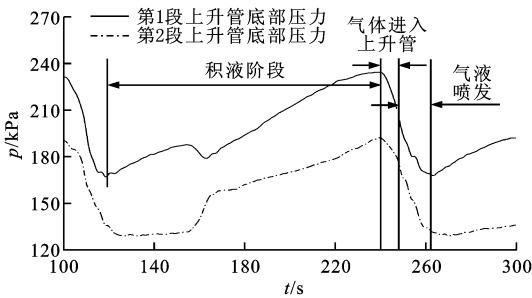


图 6 过渡型严重段塞流下两段立管的底部压力

由于没有稳定的排液阶段,在这种流型下,立管底部压力和出口持液率均无高平台, $H_L$  曲线呈向上的尖刺状(图 7).

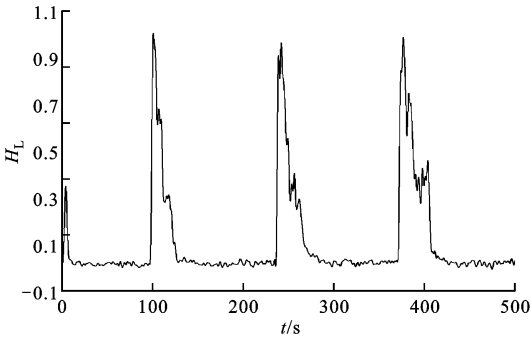


图 7 过渡型严重段塞流下立管出口持液率特征

垂直上升管气液两相块状流的 PDF 分布呈以低持液率和高持液率为特征的双峰状<sup>[13]</sup>,本文研究表明,S型柔性立管中过渡型严重段塞流下出口持液率的 PDF 分布特征与其相似,呈  $H_L$  分别为 0 和 1 的双峰结构,且  $H_L$  为 1 的峰比  $H_L$  为 0 的峰低很多(图 8). 然而,上述两种流型的流动形态却完全

不同.

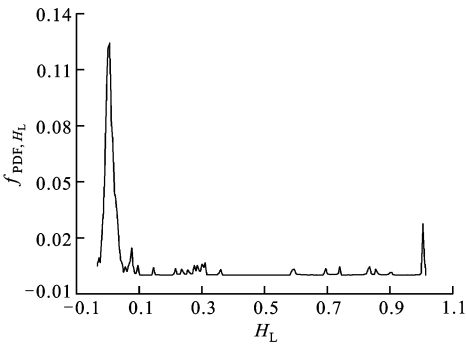


图 8 过渡型严重段塞流下立管出口持液率的 PDF 分布

3.3 稳定流动

继续增加气体或液体流速,下倾管内的分层流消失,取而代之的是间歇流,气体可以较为连续地进入立管底部,这不利于立管内积液现象的发生,过渡型严重段塞流随之消失. 流型转变后立管底部的平均压力较低,压力波动幅度很小(图 9),立管出口下游分离器和存储器等设备具有足够的处理能力,因此将这种流型称为稳定流动.

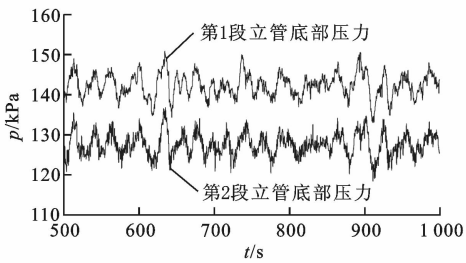


图 9 稳定流动下两段立管的底部压力

由于管内气液混合程度高, $H_L$  在某一值上下频繁波动,但波动幅度很小(图 10),相应的 PDF 分布呈以该值(约为 0.27)为峰的单峰结构(图 11).

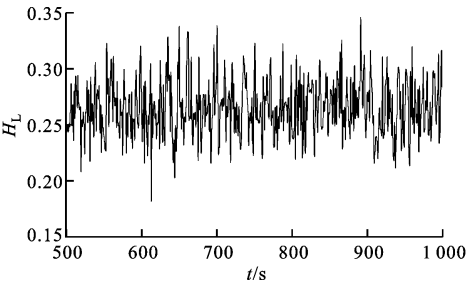


图 10 稳定流动下立管出口持液率特征

3.4 流型图

基于上述流型分类,得出下倾管倾斜角度为  $-2^\circ$  时,S型柔性立管内空气-水两相流型图,如图 12 所示,该图显示了 3 类流型的大致范围,典型严

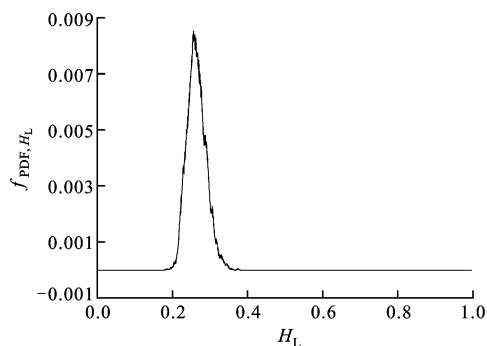


图 11 稳定流动下立管出口持液率的 PDF 分布

重段塞流发生在气相表观速度( $V_{SG}$ )和液相表观速度( $V_{SL}$ )较小的区域,随着流速的增大,管内流型依次逐渐向过渡型严重段塞流和稳定流动转变。

根据严重段塞流形成的条件<sup>[3]</sup>,可得严重段塞流与其他流型的转换边界

$$\Pi_{SS} = \frac{W_G RT/M}{W_L L_P \alpha g} = 1 \quad (3)$$

式中: $W_G$ 和 $W_L$ 分别为管道入口气、液质量流量,kg/s; $L_P$ 为管道长度,m; $\alpha$ 为管内平均含气率。

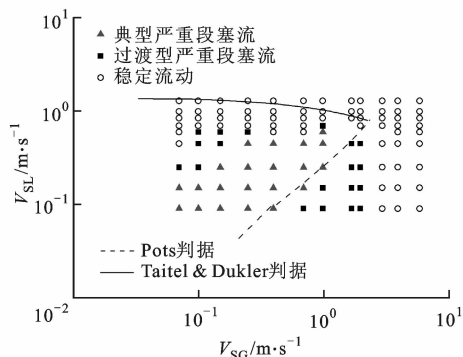


图 12 S型柔性立管流型图( $-2^\circ$ 下倾管,空气-水)

下倾管内出现分层流是发生严重段塞流的必要条件,其边界可根据 Taitel & Dukler<sup>[14]</sup>模型计算。

由图 12 可见,严重段塞流在气液流速较小的范围内发生,Pots 判据可以较好地预测本文的严重段塞流区域。

## 4 结 论

在集输-S型柔性立管大型油气水多相流实验装置上实验研究了下倾管倾斜角度为 $-2^\circ$ 时,立管内的空气-水两相流流型特征,得出以下结论。

(1)尽管 S 型柔性立管中的典型严重段塞流和垂直上升管气液两相弹状流之间,以及 S 型柔性立管中的过渡型严重段塞流和垂直上升管气液两相块

状流之间具有相似的持液率 PDF 分布特征,但其流动形态和流动特征却完全不同,可见 S 型柔性立管中的流型具有独特的特性,垂直上升管气液两相流的持液率 PDF 分布特征不适用于 S 型柔性立管中的流型。

(2)由于 S 型柔性立管和垂直立管严重段塞流的起塞机理相似,因此采用 Pots 模型可较好地预测 S 型柔性立管严重段塞流边界。

## 参考文献:

- [1] YOCUM B T. Offshore riser slug flow avoidance, mathematical model for design and optimization [C]// SPE European Meeting. Littleton, Colorado, USA: American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers, 1973:1-16.
- [2] SCHMIDT Z, BRILL J P, BEGGS H D. Experimental study of severe slugging in a two-phase flow pipeline-riser system [J]. SPE Journal, 1980, 20(5): 407-414.
- [3] POTS B, BROMILOW I, KONIJN M. Severe slug flow in offshore flowline/riser systems [J]. SPE Production Engineering, 1987, 2(4): 319-324.
- [4] TAITEL Y. Stability of severe slugging [J]. International Journal of Multiphase Flow, 1986, 12(2): 203-217.
- [5] TAITEL Y, VIERKANDT S, SHOHAM O, et al. Severe slugging in a riser system: experiments and modeling [J]. International Journal of Multiphase Flow, 1990, 16(1): 57-68.
- [6] 王鑫, 郭烈锦, 张西民, 等. 集输-上升管路系统严重段塞流实验研究 [J]. 工程热物理学报, 2005, 26(5): 799-801.
- [7] 王鑫, 郭烈锦. 集输管路上升管系统严重段塞流实验和理论模拟 [J]. 工程热物理学报, 2006, 27(4): 611-614.
- [8] 王鑫, 何利民, 郭烈锦. 集输管路上升管系统严重段塞流液塞特征 [J]. 工程热物理学报, 2008, 29(8): 1339-1342.
- WANG Xin, GUO Liejin, ZHANG Ximin, et al. Experimental study of severe slugging in pipeline-riser system [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2005, 26(5): 799-801.
- WANG Xin, GUO Liejin. Experimental investigation and simulation of severe slugging in pipeline-riser system. [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2006, 27(4): 611-614.
- WANG Xin, HE Limin, GUO Liejin. Characteristics

- of liquid slug in severe slugging at pipeline-riser system [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2008, 29(8): 1339-1342.
- [9] 何利民, 马华伟, 罗小明. 严重段塞流周期特性实验研究[J]. *高校化学工程学报*, 2009, 23(2): 223-229.
- HE Limin, MA Huawei, LUO Xiaoming. Experimental study of the period characters of severe slugging [J]. *Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities*, 2009, 23(2): 223-229.
- [10] TIN V, SARSHAR S. An investigation of severe slugging characteristics in flexible risers [C] // *Proceedings of the 6th International Conference on Multiphase Production*. Cannes, France: Mechanical Engineering Publications, 1993: 205-227.
- [11] MONTGOMERY J A, YEUNG H C. The stability of fluid production from a flexible riser [J]. *ASME Journal of Energy Resources Technology*, 2002, 124(2): 83-89.
- [12] MOKHATAB S. Severe slugging in a catenary-shaped riser: experimental and simulation studies [J]. *Petroleum Science and Technology*, 2007, 25(6): 719-740.
- [13] ITO K, INOUE M, OZAWA M, et al. A simplified model of gas-liquid two-phase flow pattern transition [J]. *Heat Transfer-Asian Research*, 2004, 33(7): 445-461.
- [14] TAITEL Y, DUKLER A E. A model for predicting flow regime transitions in horizontal and near horizontal gas-liquid flow [J]. *AIChE J*, 1976, 22(1): 47-55.

(编辑 荆树蓉)