

集输-S型立管中空气-油两相流流型特征实验研究

李文升¹, 郭烈锦^{1*}, 李乃良¹, 程兵², 姚海元²

(1. 西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 陕西 西安 710049; 2. 中海油研究总院, 北京 100027)

摘要 实验研究了集输-S型立管中空气-油两相流的流型特征。实验管路由119 m的水平段,长14 m、倾角为 -2° 的下倾段,高15.3 m、长24 m的S型立管段组成,管道内径为50.8 mm。基于S型立管底部压力、立管顶部持液率两个信号来区分立管内的流型。实验中发现S型立管内存在第二类严重段塞流、过渡型严重段塞流和稳定流动三类流型,其中稳定流动又包括泡状流、弹状流和环状流。与空气-水两相流不同,并没有观察到第一类严重段塞流。第二类严重段塞流下立管顶部持液率呈方波状,其概率密度函数(PDF)分布系以0与1为峰的双峰结构;过渡型严重段塞流下立管顶部持液率针刺状,其PDF分布基本系以0为峰的单峰结构;稳定流动下顶部持液率波动平稳,其PDF分布在0.3~0.8之间。

关键词 严重段塞流; 集输-S型立管; 空气-油两相流; 流型

中图分类号 TE83; O359+.1

文献标志码 A

文章编号 2095-7297(2014)01-0030-05

Experimental Study on Air-Oil Two-Phase Flow Patterns in a Pipeline-Riser System with an S-Shaped Riser

LI Wen-sheng¹, GUO Lie-jin¹, LI Nai-liang¹, CHENG Bing², YAO Hai-yuan²

(1. State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049, China; 2. CNOOC Research Institute, Beijing 100027, China)

Abstract Experiments on flow patterns during air-oil two-phase flow in a long pipeline-riser system with an S-shaped riser are carried out. The test loop with 50.8 mm internal diameter consists of a horizontal pipeline with 119 m in length, followed by a 14 m downward inclined section, and ended at an S-shaped flexible riser with 24 m in length, 15.3 m in height. The inclination angle of the downward section is -2° from the horizontal pipeline. Based on the analysis of the pressure at the riser base and liquid holdup at the riser top, the flow regimes observed are classified into three categories: severe slugging of type 2 (SS2), transition flow (TRS), stable flow (including bubble flow, slug flow and annular flow). In contrast with air-water two-phase flow, there is no sign of severe slugging of type 1 in the present study. As for SS2, the probability density function (PDF) of liquid holdup presents a bimodal distribution with two peaks at $H_L = 0$ and $H_L = 1$, respectively. As for TRS, the PDF curve produced by liquid holdup data presents a unimodal distribution with a single narrow peak at $H_L = 0$. As for stable flow, the PDF of liquid holdup presents a bimodal distribution between $H_L = 0.3$ and $H_L = 0.8$.

Key words severe slugging; pipeline-S-shaped riser; air-oil two-phase flow; flow pattern

0 引言

严重段塞流现象是海洋油田海底混输管线中经常遇到的流型,此类流型可能引发数倍于立管高度

的长液塞,并伴随着剧烈的液塞喷出现象,因而会引起分离器效率的降低、油田产量的减少、管线的振动以及管内壁腐蚀的加剧等问题,严重时甚至导致死井。因而,对严重段塞流现象的研究是海底管线流

收稿日期:2014-01-20

基金项目:国家科技重大专项(2011ZX05026-004-02)、国家自然科学基金创新群体项目(51121092)、国家自然科学基金重点项目(51236007)

作者简介:李文升(1986—),男,博士研究生,主要从事油气水两相及多相流动方面的研究。

* 通信作者

动安全保障的重要方面。随着海洋油田的开采逐步向深海迈进,立管长度不断增加,立管结构也更多地采用S型柔性立管,因此研究S型立管中的严重段塞流流型的发生区域有非常重要的意义。

自Yocum^[1]1973年发现集输-立管内的严重段塞流现象以来,已有很多学者对其进行了深入的实验研究^[2-6],但以上研究大多基于垂直立管,工质多采用空气-水。Tin等^[7]认为柔立管严重段塞流的压力变化特征不同于垂直立管,但Montgomery等^[8-9]的研究也发现,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。可见对S型柔性立管内的严重段塞流的认识尚有分歧。同时,实际海洋油田管道中流动的也并非简单的空气-水两相流。因此,进一步对不同工质在S型立管中的流型特征的深入研究具有重要的意义。

本文在S型立管内空气-水两相流研究的基础上,采用空气-油为工质,深入研究了集输-S型立管内两相流的流型特征,并采用S型立管底部压力信号与顶部持液率信号对不同的流型进行了区分,得

到了立管内不同流型的详细特征规律。结合以往文献^[5-6]的研究结果,本文将集输-立管内的流型分为四类^[10]:

(1) 第一类严重段塞流(SS1):立管底部压力能够达到最大值,且有稳定的液塞排出阶段(平台期)。

(2) 第二类严重段塞流(SS2):立管底部压力能够达到最大值,但没有平台期。

(3) 过渡型严重段塞流(TRS):立管底部压力没有达到最大值便开始喷发。

(4) 稳定流动:包括泡状流、弹状流与环状流三类。

1 实验系统

本文的实验结果是在西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室的常压油气水实验系统上取得的。实验管道为内径50.8 mm的不锈钢管,水平段长度为114 m,倾斜段长度为19 m,倾斜角度可在 $0^{\circ} \sim 5^{\circ}$ 之间调整,当倾角为 -2° 时,立管高度为15.3 m。实验工质包括空气、水、白油。实验系统示意图如图1所示。

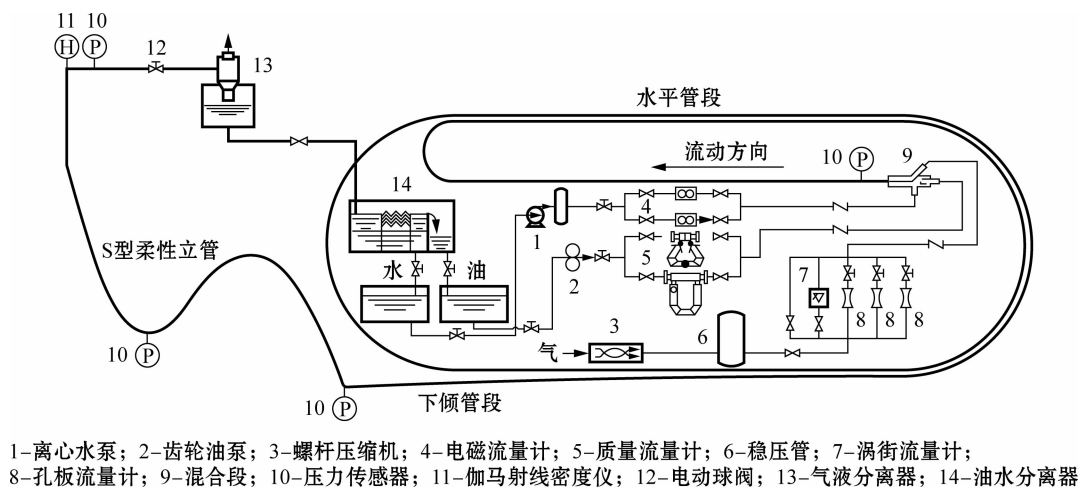


图1 实验系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental facility

油、水两相经齿轮泵加压后泵出,其流量分别由电磁流量计与Micro Motion质量流量计计量,空气经空气压缩机稳压后经孔板流量计计量。油气水三相经混合器后进入管道,在水平段充分发展后进入下倾管段及立管,然后进入气液分离器,空气排空,油水两相进入液液分离器进一步分离后进入油箱与水箱循环利用;压力、压差信号由Keller公司的压力、压差传感器计量,立管上装有伽马射线密度计用以测量立管出口处的持液率,立管顶部装有电动球

阀用来节流;信号采集由NI的Labview软件以及PCI-6255采集卡完成。本文采用的工质为空气-油(白油:LP-14)。

2 数据处理

实验中,采用S型立管底部的压力以及顶部的持液率信号作为区分不同流型的直观依据,并采用Jones等^[11]提出的使用相含率的概率密度函数(PDF)分布区分水平和垂直管内的典型流型作为进

一步流型区分的重要依据。PDF 分布可以得到任一离散随机信号的概率分布。对于一段采样时间足够长且长度为 N 的数据,若在区间 $[x - x/2, x + x/2]$ 内的变量个数为 n ,则其 PDF 分布的计算公式为

$$f(x) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta x} \left(\frac{n}{N} \right). \quad (1)$$

为便于信号的处理与区分,对顶部持液率信号作标准化处理:

$$H_L = \frac{\rho - \rho_G}{\rho_L - \rho_G}. \quad (2)$$

处理之后,持液率信号 H_L 在 0 与 1 之间变化, H_L 为 0 时表示管道充满气体, H_L 为 1 时表示管道充满液体。

3 结果分析

典型严重段塞流是一种周期性非常强烈的流型。其每个周期可分为四个阶段:液塞生长、液塞排出、气体喷发和液体回落。在液塞生长阶段开始时,立管底部被回流液体堵塞,入口来流液体会使立管与下倾管内的液位高度不断升高,立管底部压力随之持续升高,与此同时,封在下倾管内的气体的压力也在持续升高;待立管液位达到立管顶部时,下倾管段液位开始降低,直到下倾管气泡头部达到立管底部,此即液塞排出阶段,此时立管底部压力保持不变;一旦气泡进入立管,下倾管内高压气体迅速喷发,立管底部压力迅速降低,直至气体压力减小到一定值,立管内剩余液体由于重力作用回流到立管底部。图 2 为相同实验系统下采用空气-水为工质得到的第一类严重段塞流流型,由于 S 管中包含两段上升管,因此在排液阶段会观测到明显的二次喷发现象。其中 U_{GSO} 为标准状况下气相的表观速度, U_{LS} 为液相的表观速度。

然而,本文实验结果表明,集输-S 型柔性立管内的空气-油两相流流型可分为三类:第二类严重段塞流、过渡型严重段塞流和稳定流动;在相同的气、液相表观速度下,并没有观测到空气-水两相流动时的第一类严重段塞流。三类流型的详细特征如下。

3.1 第二类严重段塞流

与空气-水两相流 SS2 流型相似,由于不存在稳定的排液阶段,空气-油两相 SS2 的周期由三个阶段组成。图 3 所示为入口气液表观速度分别为 $U_{GSO} = 0.1 \text{ m/s}$ 和 $U_{LS} = 0.15 \text{ m/s}$ 时 SS2 流型的流动特

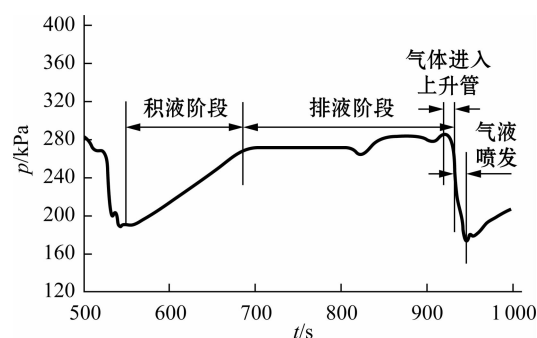


图 2 第一类严重段塞流立管底部压力曲线
($U_{GSO} = 0.1 \text{ m/s}$, $U_{LS} = 0.15 \text{ m/s}$)

Fig. 2 Pressure profile of severe slugging of type 1 at the riser base. $U_{GSO} = 0.1 \text{ m/s}$, $U_{LS} = 0.15 \text{ m/s}$

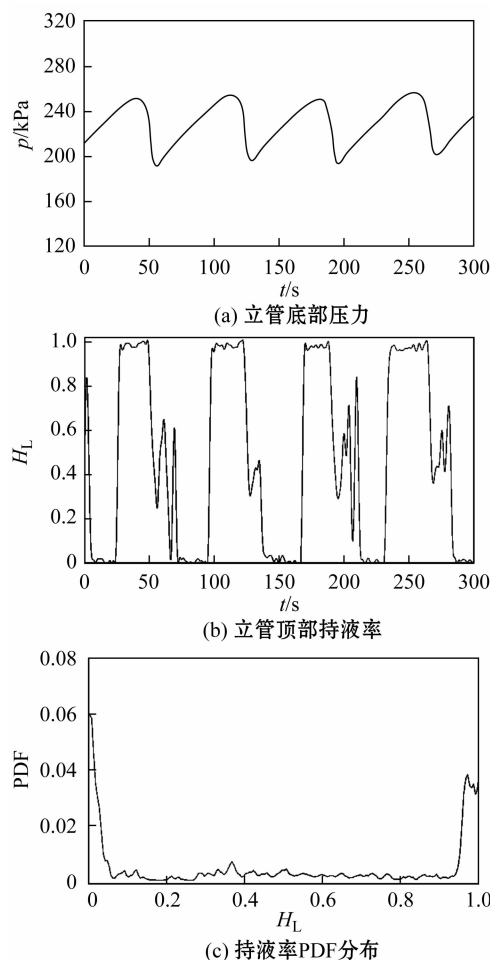


图 3 第二类严重段塞流流型特征
($U_{GSO} = 0.1 \text{ m/s}$, $U_{LS} = 0.15 \text{ m/s}$)

Fig. 3 Measurements giving the characteristics of severe slugging of type 2.
 $U_{GSO} = 0.1 \text{ m/s}$, $U_{LS} = 0.15 \text{ m/s}$

征。可以看出,SS2也具有强烈的间歇性,其持液率曲线近似为方波状,在气液喷发阶段相间界面结构复杂多变,相应的PDF系以 $H_L=0$ 和 $H_L=1$ 为峰的双峰分布。

3.2 过渡型严重段塞流

空气-油两相流 TRS 的周期性显著。其周期由液塞形成阶段、气泡进入立管、气液喷发和液体回落三个阶段组成。与 SS2 不同的是,TRS 下气泡会在液塞头部到达立管顶部之前进入立管,因此立管底部最大压力小于 SS2 时的最大压力。

图4给出了入口气液表观流速分别为 $U_{GS0}=0.25$ m/s 以及 $U_{LS}=0.04$ m/s 时 TRS 的特征。可以看出,TRS 下立管底部压力最大值要小于 SS2,立管顶部持液率为针刺状,其 PDF 分布基本系以 $H_L=0$ 为峰的单峰分布。

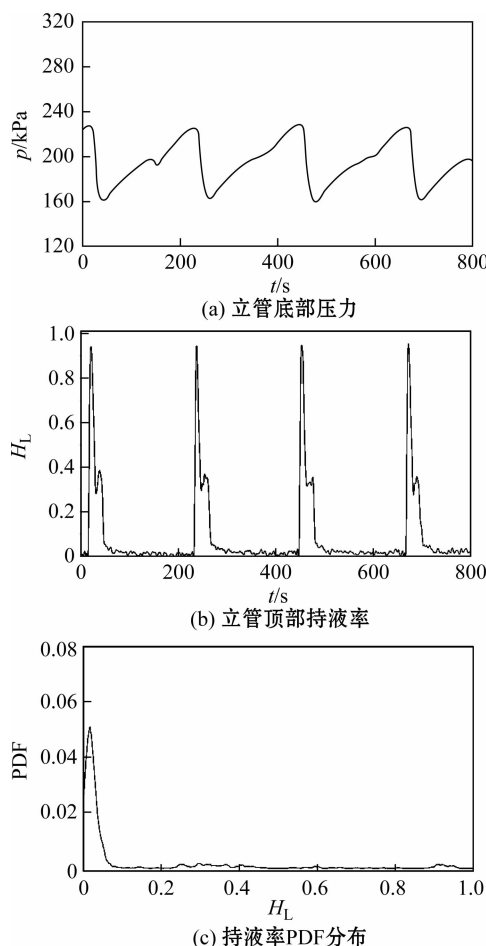


图4 过渡型严重段塞流流型特征

($U_{GS0}=0.25$ m/s, $U_{LS}=0.04$ m/s)

Fig. 4 Measurements giving the characteristics of transition flow. $U_{GS0}=0.25$ m/s, $U_{LS}=0.04$ m/s

3.3 稳定流动

图5给出了稳定流动时的流型特征,包括泡状流、弹状流和环状流三类。三类流型的详细流型特征如下。

3.3.1 泡状流

空气-油两相泡状流的气液相界面结构特征与空气-水两相泡状流特征相似。由于直径很小,气泡离散分布在连续的油相中。油相中偶尔会有尺寸较大的气泡出现,但其直径远小于管道内径。由于管内持液率较高(H_L 约为 0.68)且波动平稳,立管底部压力围绕一个较高的压力小幅无序地波动。此时持液率 PDF 分布呈单峰结构,峰值在 0.68 左右。

3.3.2 弹状流

管内交替出现液塞和 Taylor 气泡,因此持液率会呈现周期性的上下波动。但由于液塞区充满大量小气泡,同时 Taylor 气泡与管内壁之间存在液膜,因此立管顶部持液率均值在 0.55 左右;同时,立管底部压力也如顶部持液率一般周期性波动,但与严重段塞流和过渡流型相比,波动幅度很小,周期很短。弹状流下持液率的 PDF 分布在 0.3~0.8 之间,基本为双峰结构,峰值分别为 0.41 与 0.74。

3.3.3 环状流

随着入口气体流速的增大,液体无法在立管底部积聚,气体可以连续地进入立管,同时带动管壁的环状液膜向上运动,形成环状流。由图5可以看出,立管底部压力和立管顶部持液率均值较泡状流与弹状流明显降低,波动幅度小且稳定。持液率对应的 PDF 在 $H_L=0.4$ 处出现一个明显的单峰,而持液率的 PDF 主峰分布在小于 0.5 区域内则意味着环状流的存在^[11]。

4 结 论

采用空气-油为工质,实验研究了集输-S型立管系统内的两相流流型特征,得出以下结论:

(1) 实验结果显示,S型立管内存在三类流型:第二类严重段塞流、过渡型严重段塞流和稳定流动,其中稳定流动包括泡状流、弹状流和环状流。与采用空气-水为工质时的实验结果不同,在相同的气、液相表观速度下,并没有观测到空气-水两相流动时的第一类严重段塞流流型。

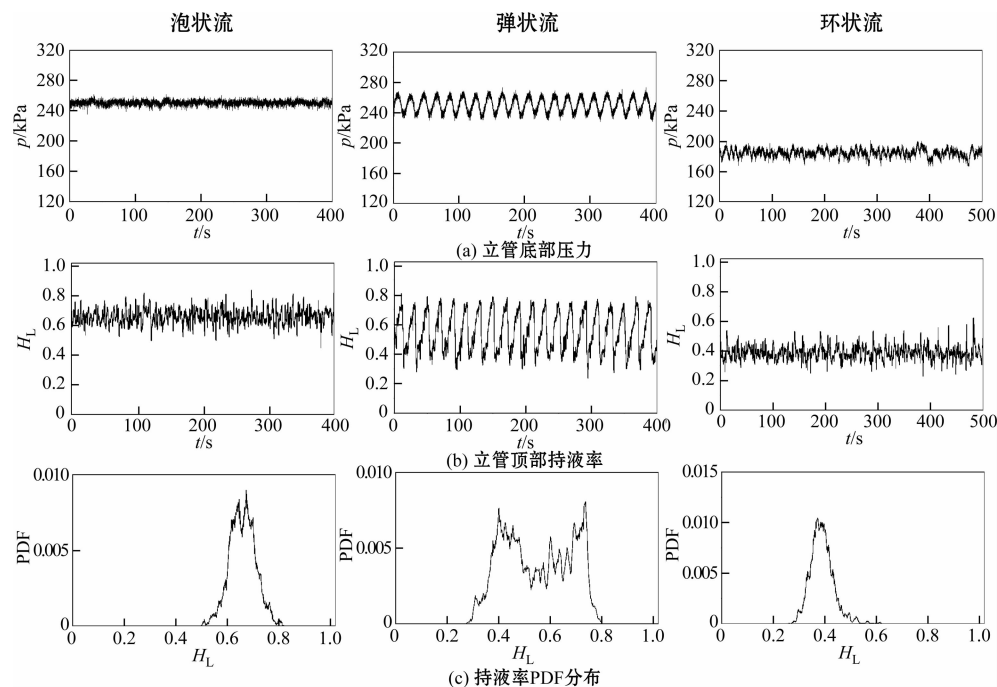


图 5 稳定流动流型特征。泡状流 $U_{GS0}=0.4$ m/s, $U_{LS}=0.7$ m/s; 弹状流 $U_{GS0}=0.7$ m/s, $U_{LS}=0.7$ m/s; 环状流 $U_{GS0}=3.0$ m/s, $U_{LS}=0.4$ m/s

Fig. 5 Measurements giving the characteristics of stable flow. For bubble flow, $U_{GS0}=0.4$ m/s, $U_{LS}=0.7$ m/s; for slug flow, $U_{GS0}=0.7$ m/s, $U_{LS}=0.7$ m/s; for annular flow, $U_{GS0}=3.0$ m/s, $U_{LS}=0.4$ m/s

(2) 由立管底部压力、立管顶部持液率的结果可以直观地区分三类流型;第二类严重段塞流的立管底部压力达到最大值,而过渡型严重段塞流的立管底部压力则不能达到最大值,同时,立管顶部持液率也有明显的区别,分别为近似方波形与针刺状。

(3) 采用立管顶部持液率的 PDF 分布为依据也能较好地地区分三类流型,同时对稳定流动包含的泡状流、弹状流和环状流也有较好的分辨能力。

参 考 文 献

- [1] Yocum B T. Offshore riser slug flow avoidance; mathematical models for design and optimization[C]. SPE, 1973: 4312.
- [2] Schmidt Z, Brill J P, Beggs H D. Experimental study of severe slugging in a two-phase-flow pipeline: riser pipe system[J]. Society of Petroleum Engineers Journal, 1980, 20(5): 407.
- [3] Pots B F M, Bromilow I G, Konijn M J W F. Severe slug flow in offshore flowline/riser systems[J]. SPE Production Engineering, 1987, 2(4): 319.
- [4] Fabre J, Peresson L L, Corteville J, et al. Severe slugging in pipeline/riser systems [J]. SPE Production Engineering, 1990, 5(3): 299.
- [5] Tengedal J Å, Sarica C, Thompson L. Severe slugging attenuation for deepwater multiphase pipeline and riser systems[J]. SPE Production & Facilities, 2003, 18(4): 269.
- [6] 王鑫. 水平管内油气水两相及多相段塞流与集输-上升管路系统严重段塞流研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2006.
- [7] Tin V, Sarshar S. An investigation of severe slugging characteristics in flexible risers [C]. Proc. 6th Int. Conference on Multiphase Production, 1993: 205.
- [8] Montgomery J A, Yeung H C. The stability of fluid production from a flexible riser [J]. J Energy Resources Technology, 2002, 124(2): 83.
- [9] Mokhtab S, Towler B F. Severe slugging in flexible risers: review of experimental investigations and OLGA predictions [J]. Petroleum Science and Technology, 2007, 25(7): 867.
- [10] 李文升, 郭烈锦, 李乃良. 集输-立管系统中严重段塞流现象与顶部节流的瞬态模拟[J]. 工程热物理学报, 2014, 35 (1): 1.
- [11] Jones O C, Zuber N. The interrelation between void fraction fluctuations and flow patterns in two-phase flow [J]. International J Multiphase Flow, 1975, 2(3): 273.