

S型柔性立管顶部节流对管内压力特性的影响

崔嵘¹, 李乃良², 戴毅¹, 张西迎¹, 蒋日新¹, 武国营¹, 郭烈锦², 李文升²

(1. 中海石油(中国)有限公司湛江分公司, 524000, 广东湛江; 2. 西安交通大学

动力工程多相流国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 在集输-S型柔性立管系统中实验研究了阀门开度对管内压力特性的影响. 实验环路由水平段、倾角为 -2° 的下倾段和S型柔性立管组成. 环路内径为50 mm, 水平段长114 m, 下倾段长16 m, 柔性立管的垂直高度为15.3 m, 全长24 m. 实验发现, 当阀门开度 Z 小于临界阀门开度 Z_{ctrl} 时, 由于流型发生了转变, 随着 Z 的减小, 系统压力急剧升高, 压力波动幅度和波动周期锐减. 对于本实验系统, Z_{ctrl} 在27%~30%之间. 提出了一个节流稳定性分析模型, 该模型可以预测节流过程中管内的流型转变, 预测结果与实验数据吻合良好.

关键词: S型柔性立管; 严重段塞流; 节流; 流型转变

中图分类号: O359 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2011)10-0122-05

Effect of Topside Choking on Pressure Characteristics in an S-Shaped Flexible Riser

CUI Rong¹, LI Nailiang², DAI Yi¹, ZHANG Xiyi¹, JIANG Rixin¹, WU Guoying¹,
GUO Liejin², LI Wensheng²

(1. CNOOC Ltd., Zhanjiang, Guangdong 524000, China; 2. State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Riser top choking is an efficient method for eliminating severe slugging in offshore pipeline-riser systems. In this study, the effect of topside choking on the pressure characteristics in an S-shaped flexible riser was explored. The test loop with inside diameter of 50 mm used in the experiment consisted of a horizontal pipeline 114 m in length, a -2° downward inclined pipe 16 m in length, and an S-shaped flexible riser 15.3 m in vertical height and 24 m in length. The results show that the flow pattern transition from severe slugging occurred at the critical valve opening Z_{ctrl} . The system pressure increased sharply and the amplitude and period of fluctuation in pressure decreased dramatically with the decrease in Z when $Z < Z_{\text{ctrl}}$. For the system in the present study, Z_{ctrl} ranged from 27% to 30%. A hydrodynamic model predicting the flow pattern transition by the effect of topside choking was developed, and the predictions agree reasonably well with the experiment data.

Keywords: S-shaped flexible riser; severe slugging; choking; flow pattern transition

严重段塞流是常见于海洋石油工业集输-立管系统中的一种现象, 尤其是在油田的中后期, 压力和产量的降低使得这种现象更为显著和普遍. 严重段

塞流是一种极为有害的危险流型^[1-5], 在此工况下, 气、液会间歇性产出, 造成原油处理系统的压力和流量出现大幅波动. 由于气体产出时间间隔太大, 平台

上的透平往往因无法得到充足的燃料而不得不转烧柴油,频繁的转切油不仅会增加燃料成本,加剧电网的不稳定性,还会大大缩短透平的寿命.不仅如此,严重段塞流还会导致管道发生振动,加剧管道腐蚀,严重段塞流造成的高背压还会降低油藏产能.

立管顶部节流法是消除严重段塞流的有效方法,这种方法通过增加背压来抑制上升管内液体的加速,从而达到消除严重段塞流的目的^[6-7],并因其具有成本低、见效快等特点而得到了较为普遍的应用^[8-9].然而,背压的增加必然会导致管内压力升高,不利于管道的安全运行.本文的主要目的是对节流过程中系统压力波动特性与阀门开度的关系进行研究,以得出能够用于指导海上平台实际生产的结论和建议.

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的油气水多相流大型实验环路上完成的.该实验系统主要由油、气、水三相储存和供给装置,流量测量设备,实验环路,以及气液和液液分离器组成,具体可参见文献^[10].

实验环路为水平-下倾-S型立管结构,整个实验段的内径均为 50 mm,由长为 114 m 的水平环道、16 m 的下倾段,以及柔性立管组成.柔性立管如图 1 所示,该实验段呈缓 S 型结构,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.下倾段的角度变化范围为 0~−5°,本文实验采用的是一 2°下倾管.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.

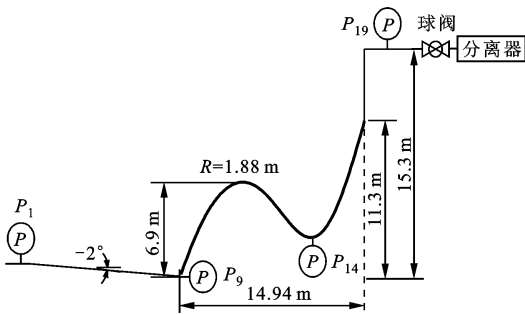


图 1 柔性立管实验段结构示意图

实验工质为气液两相,分别采用空气和自来水,油相的供应和计量装置在本实验中不使用.气液两相分别由螺杆压缩机和离心水泵提供,空气经稳压

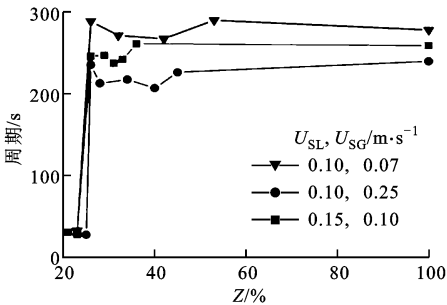
罐稳定后进入流量计量系统,而水则直接计量,气液两相经混合器混合后进入实验段进行测试.在立管出口处设置了工作在大气压力下的气液分离器,经分离后,气相被排空,液相回流水箱,以便循环利用.

实验中测量的主要参数为入口气液流量、管道入口压力 P_1 、柔性立管的第 1 段上升管底部压力 P_9 和第 2 段上升管底部压力 P_{14} 、节流阀上游压力 P_{19} ,以及阀门开度 Z .其中:气体流量采用孔板流量计计量;液体流量采用上海恒河公司生产的电磁流量计计量,精度为 0.5 级;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.本文采用安装在 S 型柔性立管出口处的 V 型电动球阀(流量特性近似等百分比特性)作为节流阀,配合相应的执行机构,便可达到指定的阀门开度.全开状态时电动球阀内径为 50 mm,与实验段内径一致.所有实验数据均由美国 NI 公司生产的 PCI-6255 高速数据采集板采集,采样频率为 200 Hz.

2 结果与分析

2.1 阀门开度对压力波动周期的影响

严重段塞流具有强烈的周期性,系统压力的周期性波动是其典型特征.图 2 是节流过程中 Z 对压力波动周期的影响,当 $Z>27\%$ 时,由于严重段塞流尚未被消除,其周期虽略有变化,但基本稳定;当 $Z<27\%$ 时,长液塞被“撕”为小液塞^[11],压力波动周期骤然减小;此后继续减小 Z 对周期的影响不大.



U_{SL} 、 U_{SG} 分别为液相、气相的折算速度

图 2 阀门开度对压力波动周期的影响

2.2 阀门开度对管内最大压力增幅的影响

本文使用节流过程中某阀门开度下一个周期内的最大压力相对未节流状态时的最大压力来描述管内最大压力增幅.

图 3~5 所示分别是 Z 对 $P_{1,max}$ 、 $P_{9,max}$ 以及 $P_{14,max}$ 增幅的影响.由图可见:当 $Z>27\%$ 时,各点最大压力基本不变化,即使略有增加,其幅度也很小;

当 $Z<27\%$ 时,各点最大压力剧增,此后即使阀门开度变化很小,也会导致最大压力发生很大的变化。

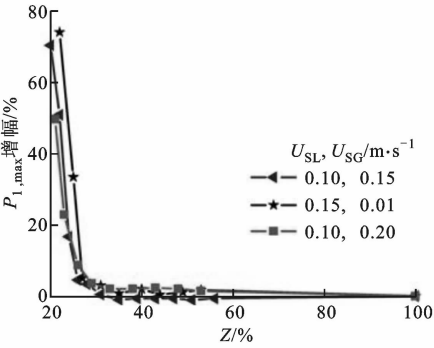


图3 阀门开度对入口最大压力增幅的影响

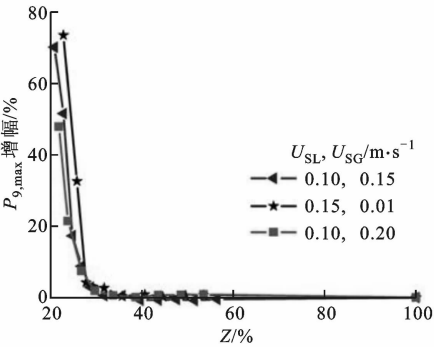


图4 阀门开度对第1段上升管底部最大压力增幅的影响

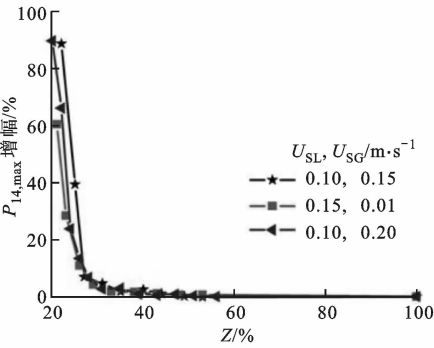


图5 阀门开度对第2段上升管底部最大压力增幅的影响

节流会使背压增加,导致节流阀在很高的压力下工作,有必要评估节流对节流阀前压力的影响.图6给出了严重段塞流节流过程中 $P_{19,max}$ 的增幅与 Z 的关系,可见其规律与管道系统内其他位置处最大压力增幅受 Z 的影响一致。

2.3 阀门开度对管内压力波动幅度的影响

图7~9给出了严重段塞流节流过程中 Z 对 P_1 、 P_9 和 P_{14} 波动幅度的影响.由图可见:管内各点压力的波动幅度总体上随 Z 的减小而减小;当 $Z>$

30%时,严重段塞流虽然受到抑制,但并未被消除,各点压力的波动幅度降低缓慢;当 $Z<30\%$ 时,各点压力波动幅度急剧降小,这是因为此时严重段塞流已转变为液塞长度极短的段塞流。

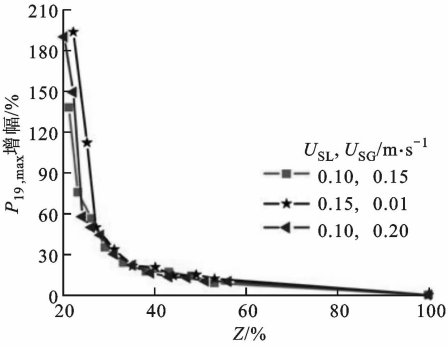


图6 阀门开度对节流阀上游最大压力增幅的影响

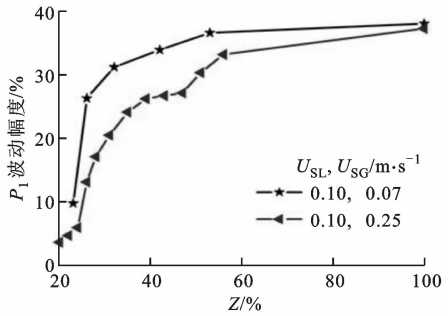


图7 阀门开度对入口压力波动幅度的影响

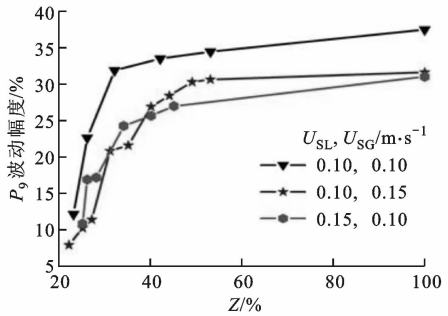


图8 阀门开度对第1段上升管底部压力波动幅度的影响

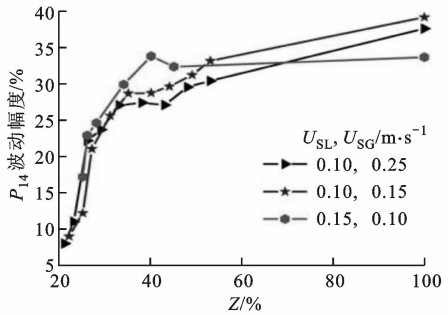


图9 阀门开度对第2段上升管底部压力波动幅度的影响

图 10 给出了严重段塞流节流过程中 Z 对 P_{19} 波动幅度的影响。由于 P_{19} 的取压点较高,严重段塞流下液体回落后的液位高度始终低于其取压点,在节流过程中 P_{19} 最小值不变而最大值升高,因此其波动幅度会先随 Z 的减小而增大;发生流型转变后,几乎不存在液体回落现象,其波动幅度会随 Z 的减小而减小。

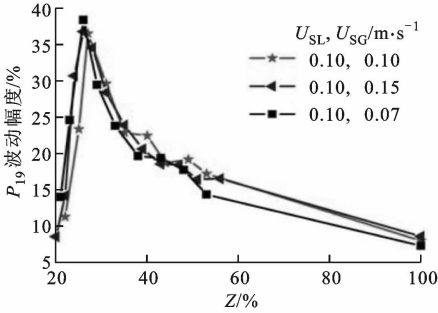


图 10 阀门开度对节流阀上游压力波动幅度的影响

通过上述分析并结合文献报道^[11],认为存在一个临界阀门开度 Z_{crit} ,当 $Z < Z_{\text{crit}}$ 时,管内流型会发生转变,从而导致系统压力急剧升高,压力波动幅度和波动周期锐减。

2.4 消除严重段塞流的最佳节流程度

由上述分析可知,一定程度的节流能极大地减小压力波动周期,从而达到消除严重段塞流的目的。然而,过度的节流却会使管道压力急剧升高。综合这两方面的因素,最理想的节流程度是既能够改变管内流型,降低压力波动周期,又不致使管内压力升高太大。研究表明,对于本实验系统,消除严重段塞流的最佳阀门开度区间为 24%~27%(见图 11)。

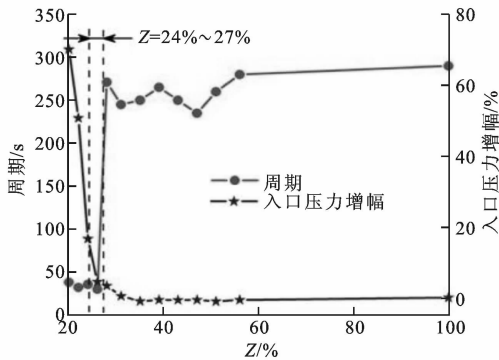


图 11 典型严重段塞流最佳节流程度的选择

2.5 顶部节流条件下立管内流动稳定性分析

从严重段塞流的第 3 阶段,即气体刚刚进入上升管时的状态开始分析。由于在严重段塞流的排液阶段,立管出口液体流速基本等于入口流速,因此假

设在气体刚刚进入上升管时,管内液体流速 U_{SL} 保持不变。

假设水平和下倾管内为充分发展的分层流,气体为理想气体,过程绝热,根据气体状态方程,有

$$P_P V_{\text{GP}} = m_{\text{GP}} RT / M \quad (1)$$

将上式对时间 t 进行微分,得到

$$P_P \frac{dV_{\text{GP}}}{dt} + V_{\text{GP}} \frac{dP_P}{dt} = \frac{RT}{M} \frac{dm_{\text{GP}}}{dt} \quad (2)$$

气体在集输管道中占据的体积为

$$V_{\text{GP}} = \alpha A_P L_P \quad (3)$$

式中: A_P 为管道内径; L_P 为管长; α 为含气率,可根据 Taitel 和 Dukler^[12] 提出的分层流模型计算。

立管底部压力为

$$P_P = \rho_L g [\varphi_1 H_1 + \varphi_2 (H_2 - y)] + P_S + \Delta P_C \quad (4)$$

式中: y 为进入立管的气泡高度; φ_1 、 φ_2 分别为第 1 段、第 2 段立管中的平均持液率; ΔP_C 为节流阀前后的压降; P_S 为分离器的工作压力。将式(4)对 t 微分,可得

$$\frac{dP_P}{dt} = -\rho_L g \varphi_2 \frac{dy}{dt} = -\rho_L g \varphi_2 U_{\text{GR}} \quad (5)$$

式中: U_{GR} 是气体进入上升管时的真实速度。将式(3)~(5)代入式(2),并注意到 U_{GR} 与表观速度 U_{SGR} 之间的关系为 $U_{\text{GR}} = U_{\text{SGR}} / (1 - \varphi_{\text{TB}})$, φ_{TB} 是 Taylor 气泡刚刚进入立管底部时的持液率(相关研究表明, Taylor 气泡的含气率为 0.89,且基本不受气液流速的影响),由于 y 相对于立管高度很小,在计算 P_P 时可以将其忽略,整理后可得

$$U_{\text{SGR}} = \frac{(1 - \varphi_{\text{TB}}) RT}{P_S \alpha A_P M} \frac{dm_{\text{GP}}}{dt} / \left(\frac{\Delta P_C}{P_S} + \rho_L g \cdot (\varphi_1 H_1 + \varphi_2 H_2) / P_S + 1 - \rho_L g L / P_S \right) \quad (6)$$

式中: dm_{GP}/dt 是管道入口的气体质量流量,视其为常数; $\Delta P/P_S$ 是归一化压降,其与 Z 之间的关联式可通过对实验数据拟合得出。

至此,可得到不同 Z 下气体进入立管底部时的 U_{SGR} ,如图 12 所示。

图 12 说明,通过顶部节流增加阀门的压降会降低气体进入立管底部时的速度,抑制第 3 阶段气体的高速喷发,当气体可以较为连续地进入到立管底部时,严重段塞流便会消失。在转变后的流型下,管内压力波动幅度大幅降低,且立管出口气液能够较为连续稳定地产出,出口下游设备具备足够的处理能力,因此称其为稳定流动。

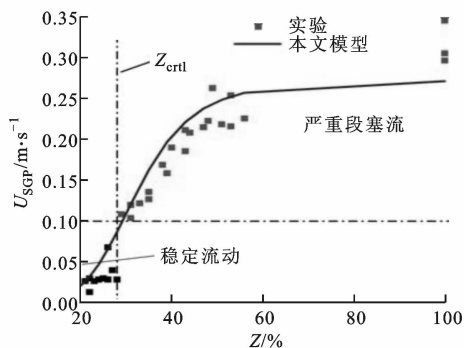


图12 节流过程中的稳定性分析

3 结论

在节流过程中,存在一个阀门开度的临界值 Z_{crit} ,当 $Z > Z_{crit}$ 时,管内为严重段塞流,管内流动特性基本不受阀门开度的影响;当 $Z < Z_{crit}$ 时,流型发生转变,严重段塞流消失,随着 Z 的减小,系统压力陡然升高,压力波动幅度和周期锐减.对于本实验系统, Z_{crit} 在 $27\% \sim 30\%$ 内.

提出了最佳节流的建议,该建议是对压力波动周期降低和最大压力升高这两个相互矛盾的因素的折中处理,对于本实验系统,最佳的节流度在 $24\% \sim 27\%$ 内.

提出了一个节流稳定性分析模型,该模型可以预测节流过程中气泡进入立管底部的速度.分析表明,立管顶部节流通过增大节流阀压降来降低气泡速度,以抑制第3阶段的气体喷发,最终可起到降低压力波动幅度和周期的作用,从而达到抑制和消除严重段塞流的目的.

参考文献:

- [1] 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.
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.
- [2] 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.
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.

- [3] 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, 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] SCHMIDT Z, BRILL J P, BEGGS H D. Choking can eliminate severe pipeline slugging [J]. Oil and Gas Journal, 1979, 77(46): 230-238.
- [7] JANSEN F E, SHOHAM O, TAITEL Y. The elimination of severe slugging: experiment and modeling [J]. International Journal of Multiphase Flow, 1996, 22(6): 1055-1072.
- [8] FARGHALY M A. Study of severe slugging in real offshore pipeline riser-pipe system [C]//5th SPE Middle East Oil Show. Richardson, TX, USA; AIME, 1987: 299-314.
- [9] 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.
- [10] 李乃良,李文升,郭烈锦,等.S型柔性立管内空气-水两相流流型特征实验研究[J].西安交通大学学报,2011,45(7): 100-105.
LI Nailiang, LI Wensheng, GUO Liejin, et al. Experimental study on flow patterns of air-water two-phase flow in S-shaped flexible riser [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2011, 45(7): 100-105.
- [11] HEDNE P, LINGA H. Advances in gas-liquid flows [M]. New York, USA; ASME, 1990: 453-460.
- [12] 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)