



# 气水两相水平流动测井的流型实验研究

路 菁<sup>1</sup>, 吴锡令<sup>1</sup>, 黄志洁<sup>2</sup>, 王界益<sup>3</sup>, 彭原平<sup>3</sup>, 何峰江<sup>3</sup>

1. 中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249
2. 中海油田服务股份有限公司, 北京 101149
3. 新疆石油管理局测井公司, 新疆克拉玛依 834000

**摘要** 为研究生产测井过程中气水两相水平流动介质分布变化特征及影响因素, 建立与产出气井流动状况相似的模拟流动环路, 以实际生产测井仪器串测量混合流体, 同时观测实验流型并绘制出实验测井流型图。实验揭示气水两相分布的变化趋势与流体动力学的普通实验结果相似, 说明测井条件下的气水两相流动依然满足一般规律, 但流型变化边界产生的位移反映了气水两相流动在生产测井过程中的分布特征。研究结果对正确认识及把握气水两相水平流动测井条件下的两相介质分布及分析方法提供重要依据。

**关键词** 气水两相; 水平流动; 生产测井; 流型图; 介质分布

**中图分类号** TE151

**文献标识码** A

**文章编号** 1000-7857(2010)03-0059-04

## Experimental Study of Horizontal Gas-water Flow Pattern During Production Well Logging

LU Jing<sup>1</sup>, WU Xiling<sup>1</sup>, HUANG Zhijie<sup>2</sup>, WANG Jieyi<sup>3</sup>, PENG Yuanping<sup>3</sup>, HE Fengjiang<sup>3</sup>

1. State Key Laboratory of Petroleum Resource and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China
2. China Oilfield Services Limited, Beijing 101149, China
3. Well Logging Company of Xinjiang Petroleum Administration Bureau, Kelamayi 834000, Xinjiang Uygur Autonomous Region, China

**Abstract** In order to study the characteristics of flow distribution changes and the factors affected by Production Logging Tool (PLT) on the gas-water two-phase flow during production well logging in horizontal wellbores, a flow-loop was built. An experimental test matrix designed to collect a maximum amount of data on the gas-water two-phase flow in horizontal wellbores was conducted on this transparent flow-loop of 16 m long, using air and tap water. Every measurement was strictly carried out in a steady-state gas-water mixed flow, by using production well logging tool-string. All flow patterns observed in these experiments were recorded by camera; all actual air and water flow rates were measured, respectively, by flowmeters located along the flow-loop. A well logging flow regime map that shows the gas-water flow patterns observed in these experiments was obtained according to these two parts of information. On the map, the variation trends of the gas-water two-phase distribution are similar to observations in ordinary fluid dynamics experiments, which means that the gas-water two-phase flow may well describe the general features in production well logging, but with its unique characteristic distribution interfered by measurements of the PLT and displayed on the flow regime map in the form of the boundaries shift. The results provide some insight for understanding the distribution of the gas-water two-phase flow during production well logging in horizontal wellbores.

**Keywords** gas-water two-phase; horizontal flow; production well log; flow regime map; contributions

## 0 引言

流动剖面测井作为生产测井的一个分支, 在油气田开发

中起到实时监测作用, 可为了解井下真实情况, 及时调整开发方案, 确保油气井高产、稳产提供可靠依据<sup>[1]</sup>。近年来被广

收稿日期: 2009-10-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(60472019); 中国海洋石油总公司综合科研项目(200608)

作者简介: 路菁, 博士研究生, 研究方向为生产测井资料处理及解释, 电子信箱: lu\_jing@yahoo.cn; 吴锡令(通信作者), 教授, 研究方向为生产测井方法研究、仪器研发及测井资料处理、解释, 电子信箱: wuxiling@sina.com



泛应用的水平井,由于有效地增加了储层的泄油面积及渗流通道,显著增加了油气田的产量,但同时也为流动剖面测井提出了新难题。多相流体水平流动由于密度的差异,使流体介质分布失去了垂直井中的对称性,这一点在气水差异极大的气井开发中更为明显,有效的监测依赖于对气水两相流动机制的充分认识。气水两相介质分布状态(即流型)直接影响测井响应及分析模型的选择,决定着测井解释的可靠性,因而成为水平井生产测井气水两相流研究中重要的基础问题。

Hoogendoorn<sup>[2]</sup>,Beggs 等<sup>[3]</sup>,Mandhane<sup>[4]</sup>,Taitel 和 Dukler<sup>[5-6]</sup>,Barnea 等<sup>[7-8]</sup>,Spedding 等<sup>[9]</sup>,Kokal 等<sup>[10]</sup>,Scott 等<sup>[11]</sup>,Petalas 等<sup>[12]</sup>,Oddie 等<sup>[13]</sup>,Oriol 等<sup>[14]</sup>先后对水平管道内的气水两相流型及转换边界问题做了不同程度的理论及实验研究,提供了可资参考的流体动力学基础。但是,这些研究都是基于理想无阻管道的流动环路实验,而生产测井过程中,仪器必须在水平井筒内移动测量,必定会干扰气水两相原有的流动状态和介质分布,测井资料分析和解释不能直接引用上述研究结果。为此,本研究采用实际生产测井仪器,在与井下真实情况相似的水平井模拟流动环路上,进行气水两相流动测井实验,将实验测井流型与经典流体力学研究结果相对比,分析引起流型变化的影响因素,为正确认识和把握生产测井条件下气水两相水平流动介质分布及分析方法提供依据。

## 1 水平气水两相流动实验

### 1.1 实验装置及介质

实验装置简图(图1)为中国石油西部钻探测井公司测试技术服务中心的多相流动模拟实验环路。

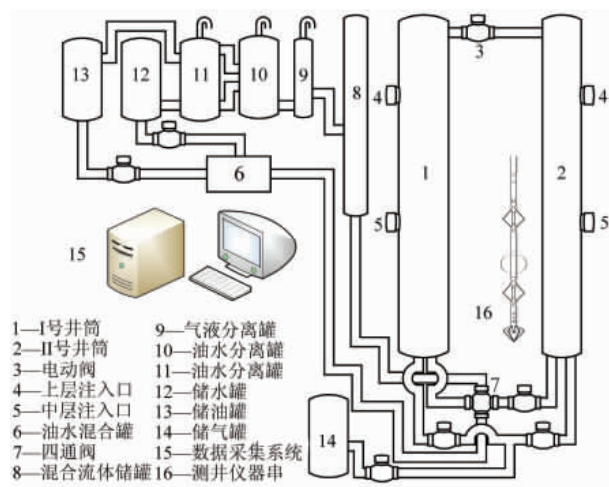


图1 多相流动模拟实验装置简图

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental multiphase flow-loop

实验装置上I号、II号实验井筒的管径,分别依据油气田开发时井下常用的17.8和14.0cm套管尺寸设计,内径分别为15.9和12.4cm,全长均为16m,两端分别为长1m的钢管,

中间材质为透明有机玻璃(便于进行流型及仪器影响观察)。实验井筒内的各相流体均由在线仪表对其实际流量、流动压力和温度进行测量,并存储于数据采集系统的数据库内。实验采用空气和自来水作为流动介质,在16℃、101325Pa下均为牛顿流体。

### 1.2 实验测量及结果

常规气田的单井井口产量一般为每天几千到几十万立方米不等,但气体从井底到井口的产出过程中,由于温度及压力降低,气体将从水中逸出,且体积明显增大,结果可使气体的体积流量增大几百倍,因此将气井井口的产气量折算到井下,实际体积流量每天约为几十到几百立方米。据此,为模拟实际气田开发过程中单井井下气水两相混合流动总流量及气水比例,实验方案将覆盖从低到高的5个总流量,分别为50、100、200、400、800m<sup>3</sup>/d,并设计各总流量下的含水率分别为0%、10%、30%、50%、70%、90%(800m<sup>3</sup>/d情况下除外)。

实验进行过程中,流动环路上的流量控制系统将气水两相总供给流量及配比依次调整并稳定到上述实验方案中的各种情况,双侧水平井筒内两相流动形态发展稳定后,用如图1中16所示的测井仪器串(由底至顶依次为全井眼涡轮流量计、电容持水率计、扶正器、阵列电容多相持率计、扶正器及放射性密度计)对II号井筒内的气水混合流动进行移动测量;同时用摄像及摄影设备对透明井筒内气水两相流动流型进行观察记录。

实验得到29个流动条件下的三大类数据,每个实验点上均包括气水实际流量、流压及温度等在线计量数据、流型的摄像及摄影记录资料及测井仪器产生的测井数据,共87组。

## 2 气水两相水平流动流型

### 2.1 气水两相水平流动流型划分

根据Barnea等<sup>[15]</sup>对水平管道内气水两相流型研究的结果,依据气水两相水平流动介质分布形态不同,将流型划分为图2所示的6种。

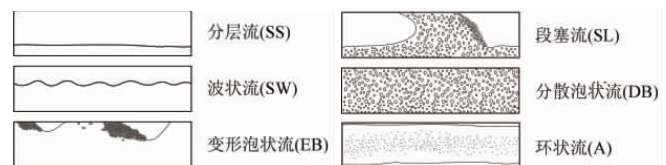


图2 水平圆管内气水两相流动流型

Fig. 2 Gas-water flow patterns in horizontal pipe

分层流(Stratified Smooth Flow,SS)气水流量均较小时,管道内水在下气在上分开流动,两相间有较光滑的界面。波状分层流(Stratified Wavy Flow,SW)气流量增大,但水流量依然较小时,气水分层面沿流动方向呈现波浪形。变形泡状流(Elongated Bubble Flow,EB)水流量增大,流量较小的气相形成栓塞状的变形气泡分布于连续的水相内,且趋向于沿管道顶部流动。段塞流(Slug Flow,SL)气水流量均较大,在水平管

中,波状流的波增长到与顶部表面接触,即将位于管道上部的气相分割而形成气弹,表现为水相中有弹形气泡列的流动。分散泡状流(Dispersed Bubble Flow,DB)水相流量极大,将气相打散,以分离的气泡散布在连续的水相内,在水平管中气泡趋于沿管道顶部流动。环状流(Annular Flow,A)气相流量极大,从而获得较大的携带力,气体(夹带有水滴)在管道中心流动形成气核,水形成液膜沿管壁向前流动。在水平管中,液膜不一定连续环绕整个管壁。

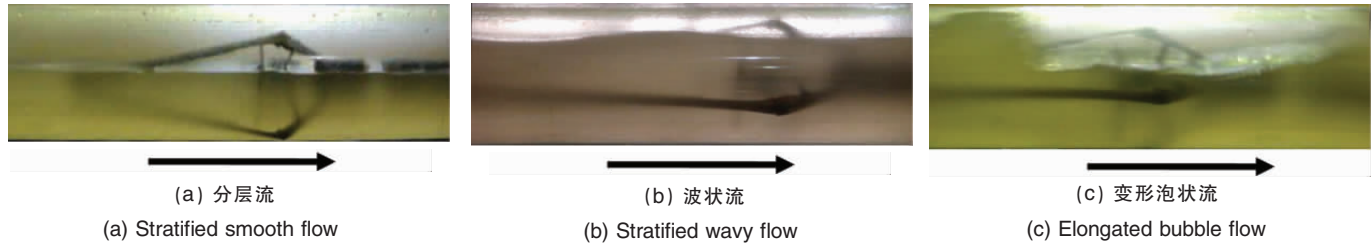


图 3 水平气水两相流动实验流型

Fig. 3 Gas-water flow patterns observed in horizontal logging experiments

### 3 生产测井流型图

#### 3.1 流型图及边界

分别以气、水两相表观速度为横、纵坐标,将上述实验中观测到的流型及实验数据绘制成如图 4 所示的流型图。其中表观速度定义为

$$v_{sw} = Q_w / A \quad v_{sg} = Q_g / A$$

式中  $v_{sg}, v_{sw}$  分别为气相表观速度与液相表观速度;  $Q_g, Q_w$  分别为气、水流量,实验过程中由在线计量仪表测量,并记录于数据采集系统数据库内;  $A$  为测井实验所在的 II 号井筒横截面积,可由其内径(12.4cm)直接计算。

图 4 中用虚线划分了本实验观察到的 3 种流型间的界线。为突出生产测井条件下水平井筒内气水两相介质分布的变化及特征,引用 Barnea<sup>[15]</sup>在管道内径 5.1cm 敞流实验中得到的气水两相水平流动流型边界线(如图 4 中的实线所示)作为对比,将其与本实验流型图及流型边界放在同一坐标系下,比较其中异同,并分析生产测井条件下,水平气水两相流体介质分布特征及变化原因。

#### 3.2 生产测井流型特征

由图 4 的测井流型转换边界与 Barnea 流型边界对比可知,两者之间具有很大程度的相似性;但相似的边界间仍存在着平移。这样的相似与差异揭示出:测井条件下的气水两相水平流动虽然具有特殊性,但依然符合流体动力学的一般规律;而边界间存在的差异正反映了生产测井仪器在测量过程中对井下气水两相流动的影响。

本实验测井流型边界与 Barnea 流型边界的差异主要表现在 SS 或 SW 向 EB 转换时水相表观速度增大,以及 SS 向 SW 转换时气相表观速度降低两个方面。

首先应该明确的是,Barnea(5.1cm 管径)流型边界指示水相表观速度约达 0.15m/s(内径为 12.4cm 管道内的水相流量

#### 2.2 实验观察到的流型

依据低、中、高产气田单井井口产量所对应的井下气水两相流量及气水比例情况,设计并实施气水两相水平流动测井实验方案,实验过程中观察并记录流动环路上 II 号透明井筒内出现的稳定状态下的流型分别为:SS、SW、EB,如图 3 所示。流型观察结果表明,这 3 种流型是常规气井中最为常见的气水两相混合流动形态。图 3 中箭头方向为混合流体及测井仪器的运动方向,图中所见测井仪器即为全井眼流量计。

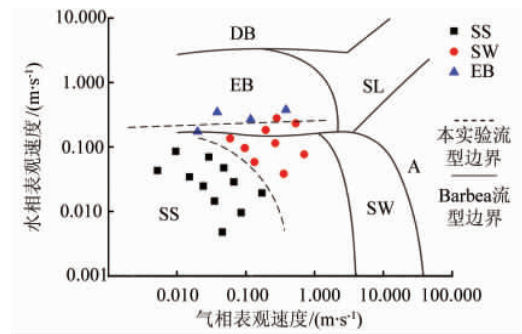


图 4 气水两相水平流动测井流型图

Fig. 4 Well logging flow regime map of gas-water in horizontal borehole

约 156m³/d)时,将发生 SS 与 SW 向 EB 的转换,而本实验测井流型边界所指示的这一转换发生在水相表观速度为 0.2m/s(内径 12.4cm 管道内的水相流量约 208m³/d)左右。这里出现的水相表观速度差(约 0.05m/s)及相应井下内径为 12.4cm 的管道内的水相流量差(约 50m³/d)不大,据 Jepson 等<sup>[16]</sup>对不同管道内径对流型转换边界影响的研究结果,管道内径增大,气液两相分层流或波状流向间歇流的转换将需要更大的液相表观速度,因此可将二者间的这一差异归结为管径的影响。

在排除了管径影响的前提下,图 4 中显示出的 SS 与 SW 转换边界平移则正体现了生产测井仪器串的移动测量对井筒内气水两相混合流体介质分布造成的影响。

从生产测井仪器串整体看,仪器串自身的体积占据了井筒内的一部分空间,迫使流体绕过管道内壁与仪器串外壁构成的环空,增加了壁面、改变了流速,使流经这一区域的流体介质分布也随之变化;另外仪器串与带动其匀速移动的电缆也会在井筒轴向对流体流动造成干扰。



从生产测井仪器串各局部看,仪器串上各类仪器在模拟井筒内与被测流体之间存在相互作用。仪器串由多种仪器组合构成,不同仪器通过不同的测量原理实现混合流体流动参数的测量。以全井眼流量计为例,流经叶片的流体带动整个涡轮转动,流体流量超过某一数值后,涡轮转速与流速成线性关系,记录涡轮转速可实现流速测量。这一过程中,混合流体轴向流动的部分能量转化为涡轮转动的能量,使流体流向及流速均发生变化;且涡轮的转动也对混合流体起到搅拌作用,引起混合流体内部扰动,改变其原来的介质分布和速度分布,使二者趋于平缓。另外如电容含水率计、放射性流体密度计等仪器都需要流体对其内腔及外壁进行绕流,也会在一定程度上对介质间分布造成影响。

通过实验观察与总结认为,以上两方面因素对气水两相混合不够充分的低速流动影响更为明显,使生产测井条件下SS向SW转换的气相表观速度下降。

### 3.3 生产测井流型图应用

将以上分析结果应用于常见的内径为12.4cm井筒内气水两相水平流动介质分布推断,可以发现:从Barnea流型边界SS向其他流型转换近乎水平与垂直的边界特征可知,在无生产测井仪器测量干扰情况下,气水相表观速度均较低的SS转换为SW主要依靠气相表观速度的增加,从机制上解释,这种转换被Barnea视为一种“风效应”<sup>[15]</sup>——转换的发生仅凭借气相表观速度增大而引起的气水界面波动。以内径为12.4cm管道折算,转换在气相流量达到约4200m<sup>3</sup>/d(井口产气量量级达到每天百万立方米)时才会发生,如果据此判断井下气水两相流型,一般的气井远不能达到。实际生产测井条件下,由于上述仪器测量对混合流体造成扰动,加剧了“风效应”对气水界面的波动,从而改变了井下原有的流体介质分布,使SS与SW间的转换在井下气水总流量达到200m<sup>3</sup>/d(井口产气量量级达10<sup>4</sup>m<sup>3</sup>/d)左右,含水高于30%就可提早发生。

因此,以常用内径为12.4cm管道开发的气井井下气水总流量增大到200m<sup>3</sup>/d以上且含水率高于30%时,分层流将发展为波状流;而当水相流量达到156~208m<sup>3</sup>/d时分层流与波状流均将转换为段塞流。

## 4 结论

通过模拟实验研究生产测井条件下气水两相水平流动流型,得到以下结论。

1) 在低、中、高产量不等的气井内进行生产测井,出现较多的3种流型分别为分层流、波状流和变形泡状流。

2) 本实验流型边界与Barnea实验流型边界之间存在的相似与差异,表明气水两相水平流动测井过程中的两相混合流型,虽然符合流体动力学的一般规律,但具有其特有的介质分布及速度分布特征。

3) 整体仪器串及局部各仪器均对管道内流动剖面及介质界面产生扰动,使速度分布及介质分布趋于均匀,界面波

动起伏;仪器串在管道内还改变了原本的流道形状,使流体轴向流速增大。两方面影响减小了分层流向波状流转换时的气相表观速度。

4) 应用生产测井流型图,根据生产测井的测量响应可以分析气水两相水平流动测井条件下的介质分布,进而正确选择解释方法和模型。

## 参考文献 (References)

- [1] 吴锡令. 石油开发测井原理[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004: 66-126.  
Wu Xiling. Petroleum production logging principles [M]. Beijing: Higher Education Press, 2004: 66-126.
- [2] Hoogendoorn C J. Gas-liquid flow in horizontal pipes [J]. *Chemical Engineering Science*, 1959(9): 205.
- [3] Beggs D H, Brill J P. A study of two-phase flow in inclined pipes [J]. *Journal of Petroleum Technology*, 1973, 25(5): 607-617.
- [4] Mandhane J M, Gregory G A, Aziz K. A flow-pattern map for gas-liquid flow in horizontal pipes [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 1974, 1(4): 537-554.
- [5] Dukler A E, Hubbard M G. A model for gas-liquid slug flow in horizontal and near horizontal tubes [J]. *Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals*, 1975, 14(4): 337-347.
- [6] Taitel Y, Dukler A E. A model for predicting flow regime transition in horizontal and near horizontal gas liquid flow [J]. *American Institute of Chemical Engineers Journal*, 1976, 22(1): 47-55.
- [7] Barnea D, Shoham O, Taitel Y. Flow pattern transition for downward inclined two phase flow; horizontal to vertical [J]. *Chemical Engineering Science*, 1982, 37(5): 735-740.
- [8] Barnea D, Shoham O, Taitel Y, et al. Flow pattern transition for gas-liquid flow in horizontal and inclined pipes: Comparison of experimental data with theory [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 1980, 6(3): 217-225.
- [9] Spedding P L, Chen J J. A simplified method of determining flow pattern transition of two-phase flow in a horizontal pipe [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 1981, 7(6): 729-731.
- [10] Kokal S L, Stanislav J F. An experimental study of two-phase flow in slightly inclined pipes -I. Flow patterns [J]. *Chemical Engineering Science*, 1989, 44(3): 665-679.
- [11] Scott S L, Kouba G E. Advances in slug flow characterization for horizontal and slightly inclined pipelines [C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition (SPE20628-MS). New Orleans, Louisiana: Society of Petroleum Engineers, 1990.
- [12] Petalas N, Aziz K. A Mechanistic model for multiphase flow in pipes [J]. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 2000, 39(6): 43-55.
- [13] Oddie G, Shi H, Durlinsky L J, et al. Experimental study of two and three phase flows in large diameter inclined pipes [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2003, 29(4): 527-558.
- [14] Oriol J, Leclerc J P, Berne P, et al. Characterization of two-phase flow regimes in horizontal tubes using <sup>81m</sup>Kr tracer experiments [J]. *Applied Radiation and Isotopes*, 2008, 66(10): 1363-1370.
- [15] Barnea D. A unified model for predicting flow-pattern transitions for the whole range of pipe inclinations [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 1987, 13(1): 1-12.
- [16] Jepson W P, Taylor R E. Slug flow and its transitions in large-diameter horizontal pipes [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 1993, 19(3): 411-420.

(责任编辑 岳臣)