

DOI: 10.7652/xjtuxb201607021

一种计量稠油中油气水三相流的方法和装置研究

潘艳芝^{1,2}, 王栋¹, 巩大利³, 鞠朋朋⁴

(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. 兰州海默科技股份有限公司, 730000, 兰州; 3. 大庆油田设计院, 163712, 黑龙江大庆; 4. 海洋石油工程股份有限公司, 300461, 天津)

摘要: 油田现场稠油井黏度大、流动性差,传统的分离计量方法很难对其准确计量;另外,稠油油井的流量范围较宽,每天产油量可以从几桶到 1 000 多桶,可以从不含气到含气率高达 80%,一般计量设备难以覆盖这样的井况条件。为了解决这些难题,研究了一种计量稠油中油气水三相流的方法,可以适应较宽的油井产量范围,该方法包含一个文丘里流量计、双能伽马传感器和配备差压传感器的小型分离器。当稠油多相流流量较高处于文丘里流量计的计量范围内时,采用文丘里流量计和双能伽马传感器来测量稠油中的油气水流量,同时考虑低雷诺数流动条件下对文丘里流出系数的实时动态计算,建立了适当的模型。当稠油多相流流量处于文丘里流量计的下限或呈间歇流时,利用小型分离器内累积的液相差压对液相进行称重式计量,结合伽马传感器测得的相分率,可得油气水流量。该方法利用伽马射线技术测量稠油的相分率,使得稠油的相分率计量更精确,不受稠油形态的影响;同时,结合准确的称重计量原理,真正实现了对稠油进行油气水三相的在线实时计量。实验结果表明,液相流量、含水率、气流量标准偏差分别为 4.2%、1.5%、6.3%。

关键词: 多相流;稠油;文丘里流量计;雷诺数;伽马传感器;小型分离器

中图分类号: O121.8;G558 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2016)07-0140-05

Investigation on the Oil-Water-Gas Measurements in Viscous Oil

PAN Yanzhi^{1,2}, WANG Dong¹, GONG Dali³, JU Pengpeng⁴

(1. State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. Lanzhou Haimo Technologies Co. Ltd., Lanzhou 730010, China; 3. Daqing Oilfield Design Institute, Daqing, Heilongjiang 163712, China; 4. Offshore Oil Engineering Co. Ltd., Tianjin 300461, China)

Abstract: Due to the high viscosity and poor mobility, it's difficult to measure the viscous oil well accurately with traditional test separator. Besides, viscous oil wells have a wide range of flow rates, often from several to thousand barrels per day, while the GVF varies from 0 to 80%. So few measuring devices are able to test viscous wells. To address this issue, this paper proposes a method for oil-water-gas measurements in heavy oil applications, which covers a wide flow range. It includes a Venturi meter, a dual gamma sensor and a mini separator equipped with a differential pressure transmitter (DPT). When the viscous oil flow rates are in the measuring range of Venturi, a proper-sized Venturi and a dual gamma sensor are used to measure the flow rates of oil, water and gas, respectively. Since the viscous oil is flowing with low Reynolds number, a suitable model was established to calculate the discharge coefficient of the Venturi. When the multiphase flow rate falls outside the low limit of the Venturi meter or it is an intermittent flow, the liquid mass flow rate can be obtained through a mini separator, where the liquid accumulates and generates differential pressure across the separator. Combing with gamma

sensor, we can get the flow rates of oil, water and gas respectively. In this method, gamma rays technology is used to conduct the phase fraction measurement more accurately. This technology is independent of viscous oil flow patterns such as emulsion. Coupling with the weighing method through the mini separator, a full range on-line measurement of oil, water and gas in viscous oil can be realized. The experiments on a prototype meter (2 inch Venturi and DN50 piping) made by this method were carried out in a multiphase test loop. The test results indicate that the measurement standard deviations of liquid flow rate, WLR (water to liquid ratio) and gas flow rate are 4.2%, 1.5% and 6.3%, respectively.

Keywords: multiphase flow; viscous oil; Venturi meter; Reynolds number; gamma sensor; mini separator

在石油工业中,多相流量计已经被越来越多的人认可,并且逐步作为传统设备的替代品得到快速发展。此外,石油生产越来越关心较高 API 导致的对气藏凝析油的处理方法和较低 API 的情况,即稠油两种极端情况。稠油井具有流量小、含气率低、原油黏度高、流动性差、原油极易形成乳化原油或发泡原油的特点。常用的稠油开采单井计量方法大多为使分离计量和翻斗量油计量法。分离计量法一般使用传统的测试分离器,对稠油进行油气水三相分离或气液两相分离后再分别进行计量。由于稠油自身的特性,分离器对稠油的分离效果比较差,分离后液体中残存的气体对于再用液相流量计或用体积流量计测量流量会造成较大的误差,而且稠油液相中的油、水也不易分离,进行油气水三相彻底分离比较困难,而进行气液两相分离、确定液相中的含水率也是一个挑战,故一般采用离线取样分析方法确定稠油中的含水率,但这并不能实现对含水率的实时在线计量。翻斗法量油是一种机械方法,设备有可动部件,对黏度较高的稠油计量误差较大,效果不理想,故障率高,且需要采用离线取样分析的方法确定稠油中的含水率,来进行油水流量的计算,未能真正实现含水率的实时在线计量和油水的实时在线计量。

传统型的测试分离器基于重力分离的原理,但稠油一般存在油水乳化严重或液中带气的问题,所以用测试分离器测试稠油会有较大误差。在过去30年里,已有各种类型的用于稠油在线计量的非分离型多相流计量设备。节流式流量计量装置,如孔板或文丘里,因其结构简单且可靠性高的优点而广受研究^[1]。流体黏度对流量计计量的影响体现在流出系数(discharge coefficient)上,在计量低雷诺数的流体时,对于流出系数受到的影响已有一些研究^[2]。一般情况下,一个单相流量计无法计量气液两相流体,需要和其他计量装置一起完成计量。

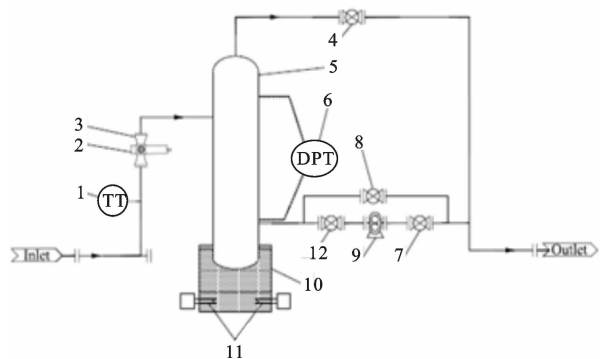
SUN 利用文丘里流量计(简称文丘里)、涡街流量计结合的方法测量油、气两相流量^[3]。ZHANG 等利用双 V 锥流量计测量高含气率的气液两相流量^[4]。Meribout 等利用声学测量结合阻抗原理的方法测量气液两相流体中每个单相流体的流量^[5]。Olivieria 等研制了利用文丘里或结合空隙率传感器装置的孔板测量气液两相质量流量^[6]。Reis 等利用文丘里喷嘴、电容相分仪的方法测量空气、水混合物的流量^[7]。

对于稠油,流量范围通常变化较大,很难使用单一的多相流量计测量所有的流量。因此,本文提出了一种准确、宽量程的方法来解决这个问题,该方法结合了伽马、文丘里及分离器技术,其中伽马技术用来测量相分率,文丘里用来测量较高的流量,微型分离器用来测量较低或间歇性油井的液流量。

1 测量装置和原理

本文的稠油测试装置包含一个合适尺寸的文丘里、双能伽马传感器和小型的分离器,如图1所示。在稠油流量较高时使用文丘里对稠油进行油气水总流量在线计量;在稠油流量较低时使用小型分离器对稠油进行气液分离,利用分离器罐体上配备的差压变送器,对稠油液相进行称重计量。结合双能伽马测得的稠油的相分率,即含气率 G_{VF} 、含水率 W_{LR} ,可计算得到高、低流量下油气水的各相流量。为了增强流经装置稠油的流动性,设备外部可缠绕电伴热并包覆保温层,分离器底部可安装直接或间接电加热器对稠油进行加热,分离器的液相出口可安装稠油齿轮泵,在排液阶段加速排液。

当稠油流量较高时,使用文丘里和伽马相分率计对稠油的油气水三相进行计量。气路控制阀、液路控制阀、关断阀设置为全开状态,分离器对流体不进行任何处理。由于稠油含气率通常比较低,且大



1:温度变送器;2:双能伽马相分率计;3:文丘里管;4:气路控制阀;5:小型分离器;6:差压变送器;7、12:手动阀门;8:液路控制阀;9:稠油齿轮泵;10:油浴加热罐;11:加热器

图1 稠油流量计计量原理图

部分气体溶解在原油中,在竖直线中多为泡状流,加上乳化严重,气、液速度接近,可近似为均相流。文丘里测得的稠油的油气水三相总体积、总质量流量、系统参数和混合密度

$$\begin{aligned} Q_t &= CK \left(\frac{\Delta P}{\rho_{\text{mix}}} \right)^{1/2} \\ Q_m &= CK (\Delta P \rho_{\text{mix}})^{1/2} \\ K &= \frac{\epsilon A}{(1 - \beta^4)^{1/2}} 2^{1/2} \\ \rho_{\text{mix}} &= (1 - G_{\text{VF}}) [\rho_o + W_{\text{LR}} (\rho_w - \rho_o)] + \rho_g G_{\text{VF}} \end{aligned} \quad (1)$$

式中: ΔP 为文丘里差压值; C 为文丘里流出系数。

文丘里流出系数 C 只有在雷诺数较高的情况下才近似为一个常数。对于稠油计量,由于稠油黏度较大,加上流量较低,故属于低雷诺数流动范围。本文基于大量不同黏度介质(25#变压器油、32#油、150#齿轮油、切削液、API 17°油和自来水)的环线实验,得到文丘里流出系数和雷诺数的关系,如图2所示。拟合得到雷诺数和文丘里流出系数的经验关系式

$$\begin{cases} C = 0.0785 \ln(Re) + 0.2945, & Re \leq 2000 \\ C = 0.017 \ln(Re) + 0.7859, & 2000 < Re \leq 100000 \\ C = 0.995, & Re > 100000 \end{cases} \quad (2)$$

雷诺数是表征流体流动特性的一个重要参数,跟油气水三相流体的混合黏度、流速、文丘里入口尺寸相关,即

$$Re = k \frac{q_m}{D \mu_{\text{mix}}} \quad (3)$$

式中: D 为文丘里入口内径; μ_{mix} 为流体混合黏度; k

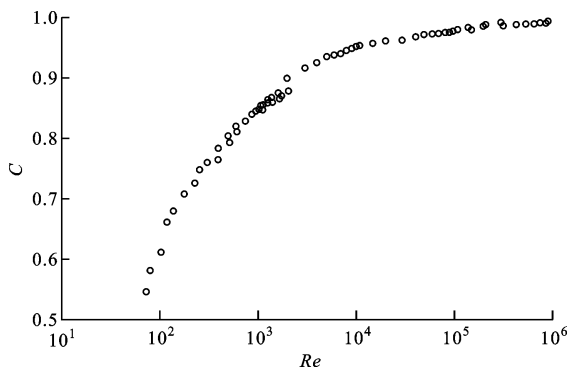


图2 文丘里流出系数和雷诺数的关系

为单位换算系数。

在式(1)~(3)中,油气水总质量流量、流出系数和雷诺数均未知,要想计算这3个量,需进行迭代计算。计算步骤为:①假定流出系数初始值 C_0 为1,通过式(1)可求得 q_m ;②通过式(3)计算得到雷诺数 Re ;③通过式(2)计算得到流出系数 C_1 ;④如果 $C_1 - C_0 \leq 0.001$,结束计算,否则令 $C_0 = C_1$ 重新执行步骤①~④,直到两个流出系数相减不大于0.001。

得到流出系数后,结合双能伽马测得的 G_{VF} 和 W_{LR} ,可得稠油中气液水油各相体积流量

$$\begin{cases} Q_g = Q_t G_{\text{VF}} \\ Q_l = Q_t (1 - G_{\text{VF}}) \\ Q_w = Q_l W_{\text{LR}} \\ Q_o = Q_l (1 - W_{\text{LR}}) \end{cases} \quad (4)$$

流量均为工况下流量,需通过恰当的稠油模型得到标况下各相流量。

为了保证文丘里测量精度,流过文丘里产生的差压通常不小于3 kPa。当稠油流量较低时,通常会超出文丘里的测量下限,故文中测量方法将不再使用文丘里对稠油流量进行计量,而采用小型分离器、相分率计的组合对稠油流量进行计量。计量过程为:首先在分离器进行积液,此时气路控制阀全开,液路控制阀全闭;关断阀关闭,在积液过程中,相分率计实时测量 G_{VF} 、 W_{LR} ,分离器上安装的差压变送器实时记录差压变化。对差压变送器通过自来水进行事先标定系数 M , M 为1 kPa差压变化对应的质量,可作为一个常数系数用于该装置。由于采用称重方法计量液体流量,含水率由上游的伽马相分率仪给出,故小型分离器中油水的混合状态对测量结果无任何影响。

在分离器积液的过程中, t_1 、 t_2 时刻差压变送器的值分别为 ΔP_1 、 ΔP_2 ,则可计算出稠油中液体的质量流量、液相的工况混合密度

$$Q_{m_1} = (\Delta P_2 - \Delta P_1)M / (t_2 - t_1) \tag{5}$$

$$\rho_{mix_1} = \rho_o (1 - W_{LR}) + \rho_w W_{LR} \tag{6}$$

结合伽马相分率计测得的 G_{VF} 、 W_{LR} , 可得稠油中液水油气各相流量

$$\left. \begin{aligned} Q_l &= \frac{Q_{m_1}}{\rho_{mix_1}} \\ Q_w &= Q_l W_{LR} \\ Q_o &= Q_l (1 - W_{LR}) \\ Q_g &= \frac{Q_l G_{VF}}{1 - G_{VF}} \end{aligned} \right\} \tag{7}$$

总之, 当稠油流量较低时, 采用分离器和相分率计的组合对稠油流量进行计量, 分离器按照积液、排液的顺序循环工作。在积液过程中装置进行稠油流量的计量, 排液的过程不进行计量, 但可将积液过程的流量平均值表示为排液过程的流量。这种计量方式的特点为取样计量, 在流量较低时, 积液的时间段远大于排液的时间段, 即使是一种取样方式, 也不失计量的准确性。

本文测量装置真正实现了对产量从大到小的稠油进行油气水三相的在线实时计量。利用伽马射线技术测量稠油的相分率, 使得稠油的相分率计量更精确, 不受稠油形态的影响。在低流量条件下, 利用分离器的差压对稠油液相的流量进行质量计量, 而非采用传统的正排量体积流量计在液路出口对稠油液相进行体积流量计量, 可避免稠油形态(如发泡稠油)对计量结果的影响。发泡稠油中的气相对差压变化的贡献可忽略不计, 差压的变化主要由发泡稠油中液相的重量变化引起, 所以差压的变化能实时准确反映液相的质量或体积流量。若在液路出口使用正排量体积流量计对发泡稠油液相体积进行计量, 则其中裹挟的大量气体对液相的体积计量会造成很大的误差。分离器的气路和液路出口处不需再安装气相和液相流量计进行计量, 节省了成本, 省却了仪表的安装、维护等工作。此测量装置可配备加热器、电伴热, 对流体进行加热来增强稠油流体的流动性, 也可配备泵, 在低流量使用分离器计量条件下用于排液阶段来加速排液速度, 从而使积液时段在一个积液、排液周期中占比更大, 缩短排液周期, 这样计量时段也更长, 能更好实现实时计量。

2 实验方法

实验样机采用文丘里管的测量范围如图 3 所示。液量测量范围为 $0 \sim 400 \text{ m}^3/\text{d}$, 含气率为 $0 \sim 95\%$, 含水率为 $0 \sim 100\%$ 。实验在海默科技多相流

环线上进行, 实验介质为空气、变压器油、水。双能传感器安装于文丘里的喉部。文丘里和小型分离器配备的差压、压力和温度采集均采用 ROSEMOUNT 公司的高精度传感器。流态稳定后, 每个实验点测试时间均为 $15 \sim 20 \text{ min}$ 。操作压力为 $0.15 \sim 0.4 \text{ MPa}$, 液体流量范围为 $1.0 \sim 17.0 \text{ m}^3/\text{h}$, 含气率范围为 $0 \sim 75\%$, 含水率范围为 $0 \sim 100\%$ 。实验环线的油路、水路单相标准表精度为 0.2% , 气路单相标准表精度为 $1\% \sim 2\%$ 。

实验过程中根据测得的文丘里差压选择测量模式。当文丘里差压小于等于 3 kPa 时, 采用小型分离器和相分率仪进行油气水三相计量, 否则使用文丘里和相分率仪进行计量。

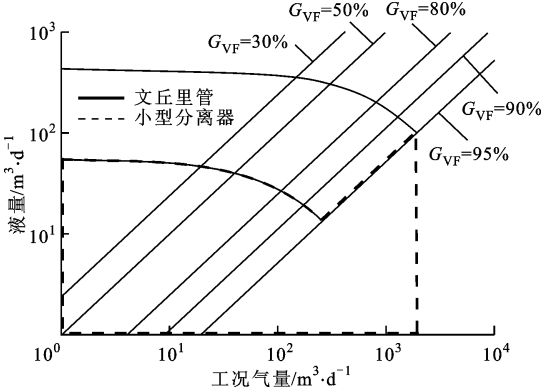


图 3 稠油流量计测量范围

3 实验结果及分析

基于环线的处理能力, 在用文中方法制造出的样机的测量范围内一共选取了 30 个测试点。通过流体经过文丘里产生的差压来选择测量模式, 其中 14 个测试点用小型分离器和相分率仪来测量的, 剩余的 16 个测试点由文丘里和相分率仪来测量。测试结果证明液流量、气流量和含水率标准偏差分别为 4.2% 、 6.3% 和 1.5% 。图 4~图 6 分别详细展示了液流量、气流量和含水率误差。

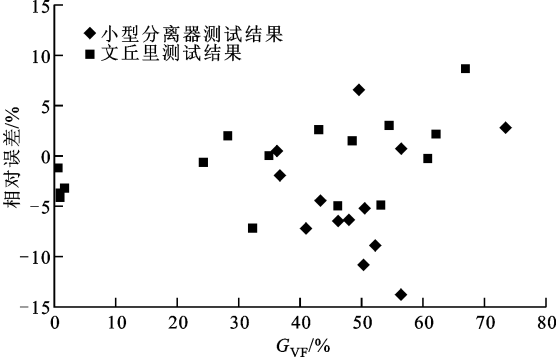


图 4 不同含气率下液流量误差

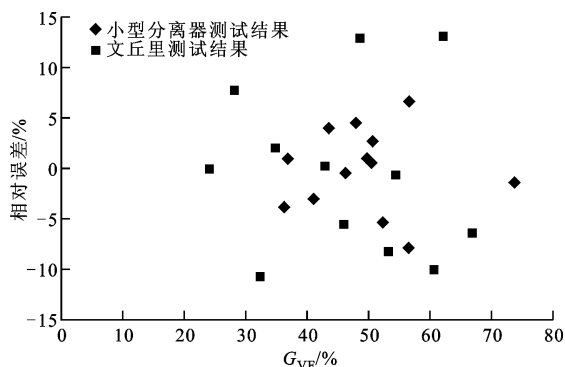


图5 不同含气率下气流量误差

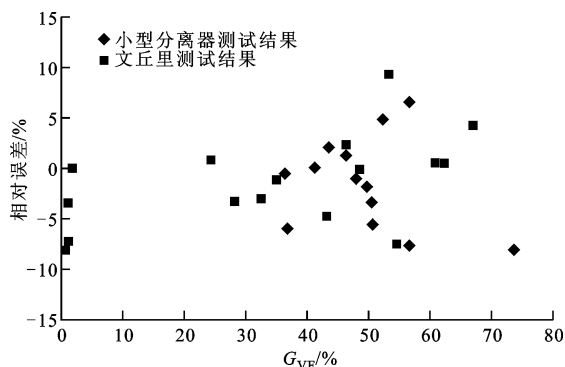


图6 不同含气率下含水率误差

4 结 论

基于稠油多相流黏度高、流动性差、液体流量范围跨度大等特点,且常伴随乳化和发泡的现象,本文提出了一种计量稠油中油气水三相流的新方法。当稠油流量较小时,通过小型分离器的取样称重方法确保了稠油中液体的测量精度;当稠油流量较高时,建立的低雷诺数文丘里流出系数模型保证了文丘里总流量的测量精度。使用伽马相分率仪测量稠油中含气率和含水率,由于伽马光子与物质之间的作用在分子尺寸上,不受宏观因素稠油形态(乳化、发泡、溶解气)的影响,是当前最准确的测量稠油中相分率技术。

根据文中测量方法制造的样机在多相流环线进

行实验,证明此方法测量的液流量、气流量、含水率标准偏差分别为4.2%,1.5%和6.3%,其精度和测量范围可满足现场大部分稠油井计量。

参考文献:

- [1] MURDOCK J W. Two-phase flow measurements with orifice [J]. Journal of Basic Engineering, 1962, 84(4): 419-433.
- [2] 马跃,郑举,唐晓旭,等. 多相流量计在渤海稠油田的应用研究 [J]. 石油规划设计, 2012, 23(1): 36-41.
MA Yue, ZHENG Ju, TANG Xiaoxu, et al. Application of the MPFM to the Heavy Oil Field of Bohai Sea [J]. Petroleum Planning & Engineering, 2012, 23(1): 36-41.
- [3] SUN Zhiqiang. Mass flow measurement of gas-liquid bubble flow with the combined use of a Venturi tube and a vortex flowmeter [J]. Measurement Science and Technology, 2010, 21(5): 055403.
- [4] ZHANG Fusheng. High GVF and low pressure gas liquid two-phase flow measurement based on dual-cone flowmeter [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2010, 21(3): 410-417.
- [5] MERIBOUT M. Investigation of impedance measurements with acoustic measurement for accurate two phases flow metering in case of high water-cut [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2010, 21(1): 8-19.
- [6] OLIVEIRA J L. Mass flow rate measurements in gas-liquid flows by means of a Venturi or orifice plate coupled to a void fraction sensor [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2009, 33(2): 253-260.
- [7] REIS E D. On the measurement of the mass flow rate of horizontal two-phase flows in the proximity of the transition lines which separates two different flow patterns [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2008, 19(5): 269-282.

(编辑 赵炜 荆树蓉)