

VFPi 垂直管流计算在油井压力梯度测试中的应用

杜军社, 杜佳闻, 熊燕, 严臣刚

新科澳石油天然气技术股份有限公司 新疆克拉玛依 834000

通讯作者: Email: dujs3834708@qq.com

引用: 杜军社, 杜佳闻, 熊燕, 等. VFPi 垂直管流计算在油井压力梯度测试中的应用[J]. 油气井测试, 2025, 34(1): 69-72.

Cite: DU Junshe, DU Jiawen, XIONG Yan, et al. Application of VFPi vertical tube flow calculation in well pressure gradient measurement[J]. Well Testing, 2025, 34(1): 69-72.

摘要 PVT 取样中存在压力梯度曲线无脱气点或脱气点滞后并高含 H_2S 气体的一类油井, 致使 PVT 取样深度难以确定。本文以井筒垂直管流理论为基础, 应用 Eclipse 垂直管流 VFPi 模块作为工具, 采用经校正流体关系式以及 VFPi 模块拟合开展了油井压力梯度和流态分析研究。应用结果表明, 单相流计算压力与实测压力对比, 相对误差小于 10%; 对于单相流油井, 井口附近可作为 PVT 取样深度; 对于多相流油井, 以压力梯度变化大的脱气点作为 PVT 取样深度。该方法可大幅减小设备腐蚀, 降低作业成本, 加快试油进度。

关键词 PVT 取样; 梯度测试; VFPi; 梯度计算; 井筒流态; 脱气点; 取样深度

中图分类号: TE353

文献标识码: B

DOI: 10.19680/j.cnki.1004-4388.2025.01.011

Application of VFPi vertical tube flow calculation in well pressure gradient measurement

DU Junshe, DU Jiawen, XIONG Yan, YAN Chengang

Xinkeao Petroleum Co., Ltd., Karamay, Xinjiang 834000, China

Abstract: The sampling depth of PVT is difficult to determine because there is no degassing point or degassing point lag and high H_2S gas content in PVT sampling. Based on the theory of vertical pipe flow in wellbore, this paper uses Eclipse VFPi module as a tool to analyze the pressure gradient and flow pattern of the well by using the corrected fluid relation and VFPi module fitting. The results show that the relative error between the calculated pressure and the measured pressure is less than 10%. For single-phase flow wells, the vicinity of the wellhead can be used as the PVT sampling depth; for multiphase flow wells, the degassing point with large pressure gradient variation can be used as the PVT sampling depth. This method can greatly reduce the corrosion of equipment, reduce the operation cost and speed up the oil testing progress.

Keywords: PVT sampling; gradient testing; VFPi; gradient calculation; wellbore flow pattern; degassing point; sampling depth

PVT 井下取样在新疆某盆油藏遇到了新的挑战, 根据取样前的井筒压力梯度测试结果不能确定取样深度。其原因是地层流体密度低 (最低约 0.56 g/cm^3) 且井筒范围内密度变化特别小, 拐点难以确定, 或者没有拐点或者出现拐点滞后; 其次就是在 $4 \sim 5 \text{ mm}$ 油嘴下, 一些油井井口压力达到 30 MPa 以上, 一些油井井口压力低, 仅约十几个兆帕。面对这些问题, 垂直井筒流流态计算分析作为解决问题的首选。李颖川^[1]、万仁溥^[2] 分别描述了井筒流流态以及井筒压力梯度计算, 其结论是精确的井筒压力计算需要准确的 PVT 分析数据; 王德有^[3] 介绍了常用的 8 种管流计算经验关联式, 并用油井实例计算对比了各关联式的使用条件和误差大小, 结论是不同管流经验关联适用不同的油藏流

体; 张伟菊^[4] 利用气体状态方程推导的压力梯度公式计算了压力梯度, 并分析了 12 口气井井筒的三种流态以及压力梯度变化规律, 指出了压力梯度变化与流态的关系。鉴于以上研究经验和方法, 针对首次遇到的 PVT 取样深度不好确定的问题, 本文采用 Eclipse^[5] 垂直管流 VFPi 模块, 对于井口压力高的油井选取 Hagedorn-Brown 经验关联式, 计算井筒压力并与实测压力比较, 相对误差在 10% 以内; 对于井口压力低的油井选取 Okiszewski 经验关联式, 计算井筒流态及压力梯度, 把液流到泡流的突变点作为 PVT 取样的深度; 对井口压力高的纯液流的油井, PVT 取样深度选在井口附近; 对高含 H_2S 未脱气的油井用计算井底压力代替实测压力, 至此实现了有效、科学地获取合格 PVT 样品, 大幅减少腐蚀和成



本支出,加快了试油进度。

1 井筒压力梯度与流态关系

对于油井压力梯度变大和变小的两种变化趋势(见图 1)以及与井筒流态的关系,可结合 Eclipse 软件中垂直管流 VFPi 模块以及相态 PVTi 模块加以解释和分析。

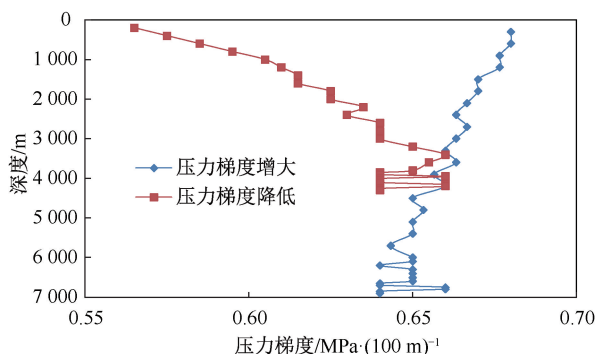


图 1 压力梯度与深度关系图

Fig. 1 Pressure gradient and depth diagram

石油工业界公认的井筒流体流动状态有 4 种类型:泡流、段塞流、环流以及雾流。每一种流态都具有不同的流动特征。流体沿井筒垂直流动时,总的压力降是由流体势能、摩阻以及动能损失三部分构成。基于动量守恒定律推出适合于两相垂直流压力梯度表达式为

$$\frac{dp}{dz} = \rho_m g + f_m \frac{\rho_m v_m^2}{2D} + \rho_m v_m \frac{dv_m}{dz} \quad (1)$$

式中: dp/dz 为压力梯度,MPa/m; ρ_m 为混合流体密度,g/cm³;g 为重力加速度,9.8 m/s²;f_m 为混合流体摩擦阻力系数;D 为油管内径,m;V_m 为混合流体流速,m/s。

引入多个描述多相流的参数,比如持液率、液体速度、气体速度、液体滑脱速度、两相平均速度等,(1)式可以转化为:

$$\frac{dp}{dz} = \frac{(\rho_m g + \tau_f)}{(1 - W_m q_c / (A^2 p))} \quad (2)$$

式中:τ_f 为摩擦阻力梯度,MPa/m;W_m 为混合物质量流量,Kg/s;q_c 为混合物体积流量,m³/s;A 为油管截面积,m²。

(2) 式是一个隐含流体 PVT 参数、生产数据以及流态相关的无因此经验相关式的非解析方程,因此需要使用迭代或者数值解法求解。

VFPi 井筒垂直流计算模块具有强大的井筒流流态计算功能。该模块提供了可供选择的 7 种石油工业界认可的井筒流态计算模型(Hagedorn-Brown、

Okiszewski、Beggs and Brill、Mukherjee and Brill 等),同时提供了在多种因素(井下设备、井口限流阀等)影响下的计算,其中最重要的功能是使用 Fitting factor 对压力梯度进行校正。因此在具有 PVT 分析^[6]数据、准确的试油数据、选取适合的流态模型以及拟合压力测试数据的前提下,可以保证获得准确的流压梯度计算结果,以此帮助分析压力梯度、流态变化并指导其实际应用。

下面以两种情况分析井筒压力梯度、流态以及关系:

(1) 当井口压力大于井口温度下的泡点压力时,油藏流体在整个井筒将保持单相流动即纯液流状态。此时流体沿井筒向上流动经历了体积膨胀(压力引起)和体积收缩(温度引起)的双重作用,而流体在未脱气状态下,温度降低引起的体积收缩远大于压力降低引起的体积膨胀,因此向井口方向压力梯度表现为增大的趋势。如对于新疆某区块油井,流体到达井口也未脱气,整个井筒流体都处于单相液流状态(PVT 分析和压力测试结果佐证)。对于这类油井应用 PVTi 模块计算其流态^[7-9],如图 2 和图 3 所示整个井段都保持单相纯液流状态,油流速度逐渐减小,动能损失很小,不予考虑,摩阻压力梯度很小且基本保持不变,液柱压力梯度主导井筒压力梯度,且二者同时增大。

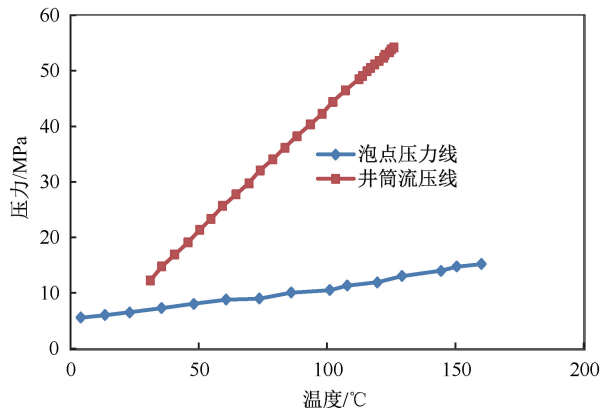


图 2 沿井筒泡点以及流压与温度关系图

Fig. 2 Pressure and flowing pressure versus temperature

(2) 当井筒某处流动压力小于该处温度下的泡点压力时,井筒将会出现多相流态。油流沿井筒向上流动过程中,在井筒下部为液相流,温度降低引起的体积收缩远大于压力降低引起的体积膨胀,结果压力梯度表现为缓慢增加的变化,随后流体到达井筒的某处(流压小于泡点压力)时,油流中的溶解气开始以小气泡的形式溢出,分散在连续的油相中,此时流态为泡流状态。该阶段压力降低引起的

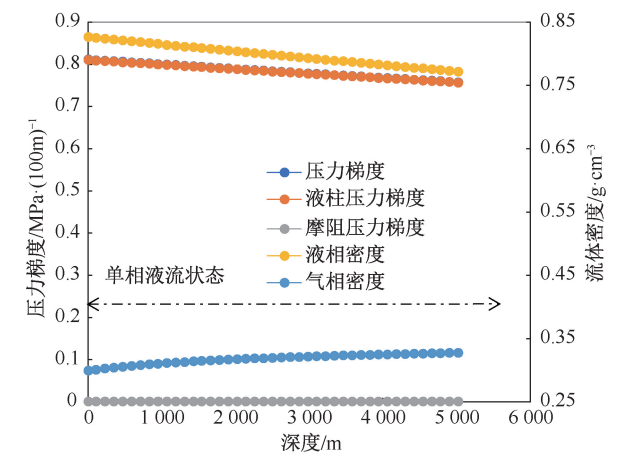


图 3 单相井筒流态计算结果图

Fig. 3 Calculation result of single-phase wellbore flow pattern

体积膨胀大于温度降低引起的体积收缩,由此压力梯度表现为先小幅减小而后大幅减小的变化趋势。随着油流到达更低的井筒压力区域,油流中的小气泡聚集成大气泡,并不断扩大以至于占据整个井筒断面,从而形成段塞流。在段塞流段,气相流速大于液相流速,摩阻梯度很小可以忽略,液柱压力梯度主导井筒压力梯度,同时二者大幅度减小。此类油井在新疆另一区块出现,有的出现液流和泡流两段,有的出现液流、泡流以及段塞流三段,无论出现哪一种情况,压力梯度总体上表现都为减小的趋势(见图 4)。

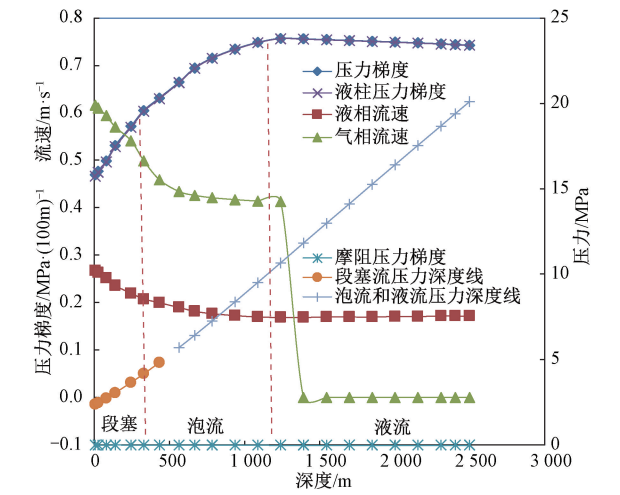


图 4 多相井筒流态计算结果图

Fig. 4 The result of calculating flow pattern for multi-phase

从多相流态计算结果还可以获知:压力深度图呈现两条直线段:液流与泡流处在同一直线段,段塞流为另一直线段,尽管泡流阶段已处于脱气状态,但压力依然与液流压力同在一直线上,脱气点反应滞后,而在深度与压力梯度曲线上液流与泡流

界限清楚,脱气点位置准确,不像压力深度图上出现脱气点滞后或者不清楚的情况。

2 现场应用

对单相流态的油井,可应用 VFPI 计算井底压力取代实测压力;对于处于两相或者三相流的油井,可应用 VFPI 计算井筒流态变化的脱气点去确定 PVT 取样深度;对于井内含有设备及接箍的油井,可应用 VFPI 计算压力的梯度识别、修正以及排除异常点,提高压力测试质量。

2.1 井筒流态计算代替压力测试

对高含腐蚀性气体及压力计下不去等处于单相流的油井,VFPI 计算结果显示相对误差为 1.4%~10.3%,平均相对误差为 7%,并随井深增加误差增大,在 6 560 m 时误差为最大 10.3%(见图 5)。因此,在准确基础数据上,应用 VFPI 计算压力代替实测压力测试,从而达到减少腐蚀、节约成本和缩短试油周期。

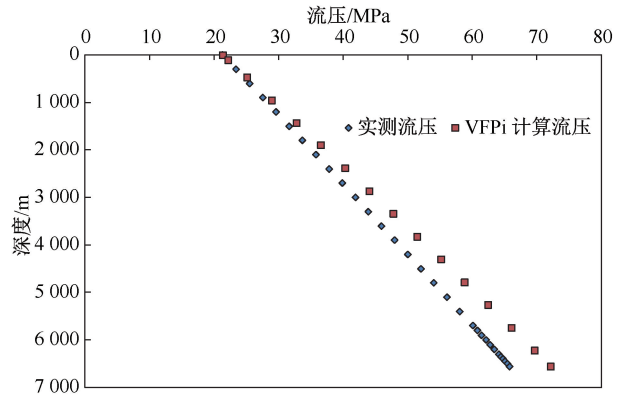


图 5 计算井筒压力与实测压力对比图

Fig. 5 Calculating pressure versus measured pressure

2.2 井筒流态计算确定脱气点

常规的油藏流体在井筒压力、压力梯度与深度图上,一般反映流态的变化的是两条直线或者两条直线,因此,油气藏流体取样方法^[10]要求在 PVT 取样前,用测试流压梯度的拐点作为 PVT 取样的深度(见图 6)。但在 PVT 取样中会出现流体密度小且变化范围小,以导致压力梯度图上出现脱气点不明显或者脱气点滞后的现象,此时应用 VFPI 计算井筒流态以及压力梯度,用梯度突变点或者流态变化点作为 PVT 取样深度。

2.3 提高压力测试质量

压力测试是油藏、井筒研究必做的基础工作,从中可以获取油藏流压、静压以及井筒流态等基础数据。压力测试时受许多因素(井筒内的接箍、井

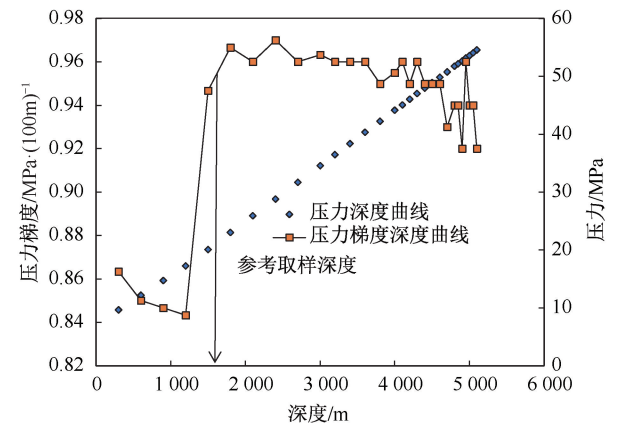


图 6 压力梯度、压力与深度关系图

Fig. 6 Pressure gradient and pressure versus depth

内设备、管柱变扣接头、压力计性能不稳定、大的测距以及差分方法^[11])影响,会产生一些异常点,以致影响其解释精度,为此可依据 PVTi 计算压力梯度来识别、修正异常点,提高测试质量。

3 结论

- (1) 油井压力梯度呈现两种变化(变大和变小)规律,其决定因素是井筒的流态。
- (2) 对高含 H₂S 处于单相液流的油井,在确保具有准确的 PVT 数据以及生产数据的前提下,计算井筒压力具有小误差,可用计算压力取代压力测试。
- (3) 对井筒内已脱气的油井,用 VFPI 计算的井筒流态以及压力梯度上的突变点或者流态变化点作为 PVT 取样深度。
- (4) 用 VFPI 计算井筒流态以及压力梯度,结合完井井况,来识别、修正压力梯度异常点,提高测试质量。

致谢:感谢新科澳石油天然气技术股份有限公司同意本文的发表。

参考文献

[1] 李颖川. 采油工程[M]. 北京:石油工业出版社,2009:

17-34.
[2] 万仁溥. 采油工程手册(上册)[M]. 北京:石油工业出版社,2009:161-215.
[3] 王德有. 油气井节点分析实例[M]. 北京:石油工业出版社,1991:59-131.
[4] 张伟菊. 压力梯度分析在气井生产中的应用[J]. 试采技术,2007,28(2):8-10.
ZHANG Weiju. Application of pressure gradient analysis in gas well production [J]. Well Testing and Production Technology, 2007,28 (2): 8-10.
[5] 卢广钦,侯健,李淑霞,等. 实用油藏数值模拟软件的开发与应用[J]. 计算机应用与软件,2003,20(8):24-25.
LU Guangqin, HOU Jian, LI Shuxia, et al. Development and application of a reservoir simulation software utility [J]. Computer Applications and Software, 2003, 20(8): 24-25.
[6] 秦积舜,李爱芬. 油层物理学[M]. 山东:中国石油大学出版社,2003:23-76.
[7] 陈家琅,陈寿平. 石油气液两相管流[M]. 北京:石油工业出版社,2010:26-105.
[8] PAGAN E. Modeling churn and annular flow regimes in vertical and near-vertical pipes with small and large diameters [D]. USA, Louisiana State University,2016: 1140.
[9] JAYANTI S, HEWITT G F. Prediction of the slug-to-churn flow transition in vertical two-phase flow[J]. International Journal of Multiphase Flow, 1992, 18(6):847-860.
[10] 油气田开发专业标准化技术委员会. 油气藏流体取样方法:SY/T 5154-2014[S]. 北京:石油工业出版社,2014:1-23.
[11] 中华人民共和国石油天然气行业标准. 常规试油试采技术规程:SY/T 5981-2012[S]. 北京:石油工业出版社,2012:1-17.

编辑 吴志力

第一作者简介:杜军社,男,1965 年出生,高级工程师,硕士,2000 年毕业于西南石油大学油气田开发专业,现从事油藏工程及提高采收率工作。电话:15999161275, Email: dujs3834708@qq. com。通信地址:新疆克拉玛依市克拉玛依区南湖小区清秀园 17-21 室,邮政编码:834000。