

一种测试油气藏岩石启动压力梯度的优化方法

朱维耀¹, 田巍^{1,2}, 朱华银³, 宋智勇¹, 孙岩¹

(1. 北京科技大学 土木与资源工程学院, 北京 100083; 2. 中国石化 中原油田博士后科研工作站, 河南 濮阳 457001;

3. 中国石油 勘探开发研究院 廊坊分院, 河北 廊坊 065007)

摘要: 瞬间动用法和两端压力平衡法测定最小启动压力梯度, 耗时都较长, 且数据准确度不高。“压差-流量法”测试拟启动压力梯度, 在定围压模式下的测试结果会偏大。基于上述分析, 设计出了一体化实验流程, 并制定出“非稳态动用-压力平衡法”, 优选出“压差-流量法”最佳实现方式。该流程通过采用精密设备来保证测试数据的精确度, 且适用各种渗透率范围岩心的测试。通过将本方法应用于吐哈油田岩心测试, 测定结果符合预期, 可以将该方法推广到实验室测量中。

关键词: 有效围压; 最小启动压力梯度; 压差-流量法; 非稳态动用-压力平衡法; 低渗透气田

中图分类号: TE37

文献标识码: A

An optimization method to measure rock threshold pressure gradient of oil and gas reservoirs

Zhu Weiyao¹, Tian Wei^{1,2}, Zhu Huayin³, Song Zhiyong¹, Sun Yan¹

(1. School of Civil and Resources Engineering, University of Science & Technology Beijing, Beijing 100083, China;

2. Working Station for Postdoctoral Scientific Research of Zhongyuan Oilfield Company Ltd., Puyang, Henan 457001, China;

3. Langfang Branch, Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina, Langfang, Hebei 065007, China)

Abstract: Instantaneous threshold method and dual-ends pressure balance method are commonly used to test minimum threshold pressure gradient, but they are time-consuming and hard to ensure the accuracy of measurement data. The test results of pseudo threshold pressure may be slightly higher by using method of “differential pressure-flow” under constant confining pressure. Based on the above considerations, a set of integrated experiment process is designed, and the method of unsteady threshold-pressure balance is formulated. Also the way to implement the method of “differential pressure-flow” is optimized. The accuracy of the test results is ensured by using precise equipments in the experiment process, and the process is suitable for a wide range of core permeability test of threshold pressure gradient. Test results meet the expectation when this method is applied to well cores in Tuha oilfields, and this method can become a common measurement in the lab.

Key words: effective confining pressure, minimum threshold pressure gradient, method of differential pressure-flow, method of unsteady threshold-pressure balance, low permeability gas field

近年来,低渗透油气田开发是国内外研究的热点,低渗透致密气藏研究也逐步展开,致密气藏特殊的渗流特性和规律^[1]也越来越受到油气田开发工作者的重视。启动压力梯度^[2]正是其研究的关键之一,而对于启动压力梯度的测试,国内外没有统一的测定标准和方法。有学者^[3-5]对实验方法进行过研究,但仅仅是对文献的总结,没有形成系统的方法。为了改善这一

现状,笔者详细分析了目前启动压力梯度测定方法中存在的问题,并提出了解决方案。目前测试最小启动压力梯度的方法主要包括测定流体动用瞬间压力和岩心稳定前后的液位差,两者都有缺陷。拟启动压力梯度的测定采用稳态法中“压差-流量法”,但是实验测试点的实现方式有4种,不同的测试点实现方式所求得的结果也有差别。如何才能测得更接近于实际的结

收稿日期:2015-06-18;修订日期:2016-03-25。

第一作者简介:朱维耀(1960—),男,教授、博士生导师,渗流力学、流体力学和油气田开发。E-mail:weiyao@sina.com。

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2013CB228002)。

果,这就需要研究工作者不断深入研究和解决。本文在总结前人经验的基础上进行优化创新,设计出一套一体化流程,可用于各种流体启动压力梯度的测定,希望能为以后的研究提供有价值的参考,为进一步提高油气采收率贡献力量。

1 现有测试方法

1.1 最小启动压力梯度

最小启动压力梯度也称真实启动压力梯度,是最能反映孔隙中流体从静止到被动用瞬间的压力梯度临界值,该临界值也是理论工作者较为认可的一个参考值。关于最小启动压力梯度的测试,目前采用的方法主要包括瞬间动用法和两端压力平衡法两种。

1) 瞬间动用法

也称气泡法^[6-9],即测定孔隙中流体动用瞬间的压力。当孔隙中充满流体时,在入口端加压情况下,驱替压差从低逐渐升高,岩心中压力梯度越来越大,当压力梯度超过某一值后,注入的流体在克服注入端面各种阻力后进入岩心孔道,如果忽略注入过程中流体发生微小压缩的体积,那么由于压力的传递作用,孔隙中的流体就会发生微流动并传递到出口端面,而在出口端面会有流体渗出,实验室就是通过测定该流体被动用瞬间的压力作为最小启动压力。

2) 两端压力平衡法

是将测得岩心进出口压力稳定时的压差作为最小启动压力,其实现方式通常有两种:①静液位平衡方式^[10-15]。依据连通器的原理,在岩心前端给定一个较高的液位高度,相当于进口加压,观察液柱高度的变化,直到液位稳定,两端的液位差即为最小启动压力;②压力衰减平衡方式^[16-18]。孔隙流体渗流稳定后,将下游出口端放空,等待上游压力缓慢衰减直至稳定,将测得的压力平衡稳定时两端压力差作为最小启动压力。

上述两种测试方法是室内测定最小启动压力梯度常用的测定方法,但由于所采用的仪器设备精度的不同以及测定方法本身的缺陷导致所测得结果的精确度不高。

1.2 拟启动压力梯度

拟启动压力梯度的测定多采用“压差-流量法”^[19-25],也称稳态法。通常将非线性渗流曲线分为曲线段和拟线性段两部分,而通过求得拟线性段反向延长与压力梯度坐标轴交点的值作为拟启动压力

梯度。为此,在室内测定时就要求分别测定不同注入压力下流体渗流稳定时的流量,并注入压力换算成压力梯度,再用数学的方法将上述实验点线性回归得到直线方程,然后计算回归直线与压力梯度轴交点值。

实验点经线性回归拟合得到直线方程通式为:

$$Q = \frac{KA}{\mu} \left(\frac{dP}{dL} - \lambda \right) \quad (1)$$

式中: Q 为流量, mL/min; A 为岩心的截面积, m^2 ; dP 为岩心进、出口压力差, MPa; L 为岩心总有效长度, m; $\frac{KA}{\mu}$ 为流量与压力梯度拟合直线的斜率, $\frac{KA\lambda}{\mu}$ 为直线截距; λ 为所求得的拟启动压力梯度值, MPa/m。

由于“压差-流量法”是通过实验点回归拟合求得拟启动压力梯度值,且求得的数值较大,所以其结果多不被理论工作者接受。另一方面,由于实验手段的不同,测得的结果也是千差万别,没有可比性,数值的可靠性得不到保证,但却是最直观有效的方法。

“压差-流量法”要测定很多组压差和流量数据,实验点的测定目前没有统一的标准。通常采用的流体注入方式分为两种:恒定流量注入和恒定压力注入。即按照设定的流量(压力)注入实验流体,分别测定不同流量(压力)对应渗流稳定的压力(流量)。由于低渗岩心的特殊性,围压施加方式的不同,可能会使得岩石本体由于受到有效应力的变化而发生较大的本体变形,即发生应力敏感。实验过程中,围压的施加方式一般分为恒定围压和恒定净围压^[26]两种模式。因此要全部测定出预定实验点共有4种实现方式:①在恒定围压模式下,测定不同注入流量对应的压力;②在恒定围压模式下,测定不同注入压力对应的稳定流量;③恒定净围压模式下测定不同注入流量对应的压力;④恒定净围压模式下测定不同注入压力对应的稳定流量。不同的实现方式所测得数值拟合结果也有差别,然而目前的文献几乎都没有交代测定实验点所采用的实现方式。

2 问题与对策

2.1 最小启动压力梯度

最小启动压力梯度是流体从静止到流动瞬间的真实启动压力梯度,所以其数据是有意义的。但是目前实验室测定最小启动压力梯度所采用的方法都不完善。瞬间动用法只强调测定流体动用瞬间的压力值,

而没有考虑压力传递从岩心进口端到出口端时间的滞后性,孔隙中流体的状态是从静止到流动;而对于两端压力平衡法,无论是静液位平衡方式还是压力衰减平衡方式,孔隙中流体的流动状态是从流动到静止,由于低渗岩心孔喉细小,压力平衡需很长时间。静液位平衡方式测定最小启动压力是最粗略的方式,人为读数,影响因素较多,准确的液位值很难读取。

综上,可以发现其中存在的问题。首先,都忽略了流体在孔隙中流动压力传递缓慢带来的误差,即压力从进口传递到出口的时间延迟性;其次,实验设备的精度,真实启动压力梯度一般较小,采用常规的实验设备可能会出现数值较大的误差,甚至出现零点漂移,因此要采用高精度的实验设备;最后,模拟实验情况和实际地层条件的符合度,模拟的情况和地层的实际情况越接近,所测得结果越可靠,对油田现场就越有意义。

基于上述分析,在室内实验时可以采取以下措施:

①升压的过程要缓慢,观察到流体被动用后停泵,给出一定的平衡时间,直到进、出口压差值稳定,通过压力传感器观察压力的变化;②采用高精度的高线性压差传感器采集岩心进、出口压差数据;③精确模拟地层条件,实验温度和上覆压力等条件要严格和实际地层条件相符,这样测得数据才可靠。

2.2 拟启动压力梯度

测定拟启动压力梯度采用“压差-流量法”,但由于测定实验点实现手段的不同,测定的结果也相差悬殊。恒定围压和恒定净围压模式是对岩石本体作用的两种方式,正是围压作用方式的不同导致了岩石骨架变形程度的差异,从而引起岩石渗流效果的不同,正是渗流效果的变化导致了实验点线性回归拟合求取拟启动压力梯度数值的可信度降低。

在恒定围压模式下,注入驱替流体无论是采用恒定流量还是恒定压力方式,整个测定过程中,岩石均发生应力敏感。当注入压力较小时,岩石所承受的净围压较大,岩石本体压缩严重;在注入压力增大后,岩石承受的净围压变小,岩石压缩变形程度也变小,岩石本体受力状态与前者相比已发生变化。在有效围压由大变小的过程中,岩石骨架形变量越来越小,岩石由弹性形变阶段逐渐过渡到塑性形变阶段。当有效围压较大时,岩石的形变主要是骨架被压缩,变形幅度较小;当进入塑性形变阶段,有效围压的变化会引起渗透率的大幅变化,出现大孔喉的状态恢复和微裂缝的复裂,岩石渗流效果逐渐变好。因此,在进行实验点线性回归

拟合时该实验点就会凹向流量轴,导致计算的拟启动压力梯度数值偏大。在恒定流量注入时,渗流稳定所需时间较长,而恒定压力注入测定实验点所花费时间相对短些。

在恒定净围压模式下,无论采用哪种流体注入方式,岩石受压变形都是恒定的。因此,流体无论是高压注入还是低压注入,岩石的渗流效果都是恒定的,这样所测的实验点经线性回归拟合时相关性较好,而且数值较准确。在恒定流量注入时,由于围压是一直变化的,这就导致岩心总是处于动态中,渗流稳定所需时间相对较长。

经上述分析优选可以发现,测定拟启动压力梯度较为理想的测试点实现方式是在恒定净围压模式下,流体以恒定压力方式注入。

3 一体化测试优化方法

基于上述分析,并综合考虑以往方法中存在的问题与对策,设计出了一套测定启动压力梯度的一体化流程(图1)。该流程的优点是使用了高精度的压力传感器和高线性压差传感器。高精度设备的使用决定了其适于各种流体和较大渗透率范围岩心启动压力梯度测试,而且操作较简便,电脑采集所有数据,排除了人为误差的可能。

3.1 一体化测试流程

渗流装置选用先进的 Auto-flood™ (AFS300™) 驱替评价系统。为了更准确模拟地层实际应力变化特征,实验装置选用三轴岩心夹持器。注入泵为高精度

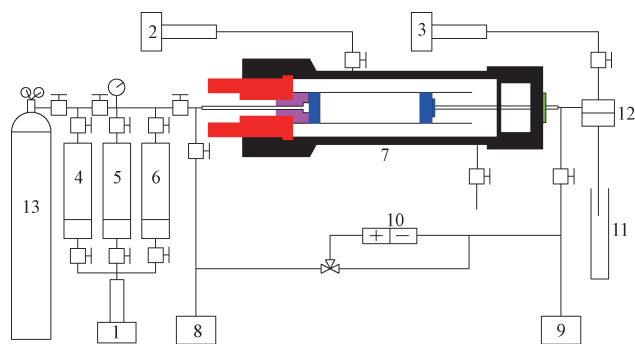


图1 启动压力梯度一体化测试流程

Fig. 1 Flow chart of the integrated test measurement of threshold pressure gradient

- 1,2,3. 注入泵;4,5,6. 储气、储液中间容器;7. 三轴岩心夹持器;
8,9. 压力传感器;10. 高线性压差传感器;11. 液体收集装置;
12. 空气弹簧式回压阀;13. 高压干燥氮气瓶

恒速恒压泵,泵流速范围在 0.01 ~ 50.00 mL/min (压力 ≤ 70 MPa),精度为 $\pm 0.3\%$ (最大密封泄漏为 $0.25 \mu\text{L}/\text{min}$)。采用高精度多级柱塞泵 (Teledyne isco100 - DX) 控制围压和回压,该泵可根据需要设置为恒压和恒流量模式,回压阀采用 BP - 100 空气弹簧式回压阀。

压力采集使用 DXD 高精度数字压力传感器,测试精度为 $\pm 0.02\%$,并通过采用高线性压差传感器 (型号为 validyne) 装置来精确测量岩心两端的压力差,系统定时自动采集数据并完成相应数据分析。

3.2 一体化流程的应用测试方法

1) 气体启动压力梯度测试

①将岩心在 $108\text{ }^{\circ}\text{C}$ 烘干 48 h 以上,而后分别测定岩心长度、直径、孔隙度及渗透率等数据;②将岩心以上述测渗透率相同方向装填入岩心夹持器;③接通流程,首先校正仪器,对仪器初始值调零,而后同时升高围压和回压,升压过程要以 2 MPa 为步长,以 30 min 为间隔,逐级增压至上覆压力和地层压力值,恒定不变,并升温至实验温度;④中间容器中充满气体,将岩心夹持器出口管段的出口置于流量收集装置液面下 (将出口管段中可能存在的液体排空),流量收集装置中装满清水;⑤通过注入泵以 $0.01\text{ mL}/\text{min}$ 的流量为中间容器加压,观察收集管中液面下的出气管口,观察到第一个气泡冒出后立即停泵,并关闭三轴岩心夹持器进口阀门,静置;⑥观察数据采集系统采集到的压差传感器数据值,直至该值稳定,数据稳定所需时间参照公式 (2),此稳定的数据即为最小启动压力。

通过大量实验观察总结,进、出口压差稳定所需时间 (从停泵到压差数据稳定的时间) 符合下式:

$$t = 48(4 - n) \quad (2)$$

式中: t 为所需时间, h; n 为渗透率的数量级。计算时将渗透率换算成科学记数法 ($1 \times 10^n \sim 9.9 \times 10^n$) $\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的形式。

2) 液体最小启动压力梯度测试

岩心前处理同 1) 中步骤①,而后抽真空 12h 以上饱和标准盐水,其余步骤同 1) 中步骤②—⑥,使用充满标准盐水的中间容器开展实验。

3) 油 - 水两相启动压力梯度测试

①岩心前处理同 1) 中步骤①,而后抽真空 12h 以上饱和标准盐水;②同 (1) 中步骤②,③,然后以 $0.01\text{ mL}/\text{min}$ 的注入速度用模拟油驱替岩心中的水,直至采出液含水 100% 为止,而后停泵,并关闭夹持器进出口阀门,老化 12h 以上;③同 1) 中步骤③,以下操作同 1)

中步骤③—⑥,使用的中间容器充满标准盐水。记录稳定时系统采集的高线性压差传感器数据。

4) 拟启动压力梯度测试

①岩心前处理同 3) 中步骤①;②同 1) 中步骤②,③;③设定注入泵净围压为 3 MPa,打开夹持器进出口阀门,启动驱替泵,以恒定注入压力的方式注入实验流体,观察注入流量的变化,待采出流量稳定后,记录该压力下的稳定流量值;④更换下一设定注入压力,重复步骤③,直至执行完所有实验设计压力,结束实验。

上述前 3 种方法中,整个实验过程孔隙流体流动状态是静止—瞬间流动—静止。该过程综合了瞬间动用法和两端压力平衡法的优点,该法称为“非稳态动用 - 压力平衡法”。

4 实例应用

实验选取吐哈油田某区块同一层位岩性相同的岩心,地层压力为 25 MPa,上覆压力为 30 MPa,地层温度为 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$,饱和盐水矿化度为 $80\,000\text{ mg}/\text{L}$,原油粘度 $3.5\text{ mPa} \cdot \text{s}$ 。岩心经处理后,钻取为直径为 2.5 cm 长度为 5 cm 左右的岩心柱,所选取岩心基础参数见表 1。

岩心拟启动压力梯度的测试采用“压差 - 流量法”,其他 3 个启动压力梯度的测试均采用“非稳态动用 - 压力平衡法”,按照 3.2 的方法开展测试,测试结果如图 2 和图 3 所示。

图 2 表明,岩心的启动压力梯度随着渗透率的增加而减低,而且在渗透率较小 ($< 0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$) 时,启动压力梯度随渗透率的增加而急剧降低,除气体启动压力梯度外,都符合良好的乘幂关系。如表 2 所示,在渗透率超过 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 以上,启动压力梯度随渗透率的增加而降低的幅度趋于平稳,当渗透率从 $0.001\,0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 升到 $0.013\,9 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 再升到 $8.400\,0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 时,液体最小启动压力梯度从 $4.001\text{ MPa}/\text{m}$ 降到 $0.037\text{ MPa}/\text{m}$ 再降到 $0.011\text{ MPa}/\text{m}$,下降幅度分别为 $3.631\text{ MPa}/\text{m}$ 和 $0.359\text{ MPa}/\text{m}$ 。

表 1 实验选取岩心基础参数

Table 1 Basic parameters of cores selected in the experiment

编号	长度/cm	直径/cm	渗透率/ $(10^{-3} \mu\text{m}^2)$	孔隙度/%
JS - 1	5.28	2.51	0.001	4.72
JS - 2	5.22	2.51	0.013	5.17
JS - 3	5.17	5.49	0.150	8.43
JS - 4	5.23	2.50	2.700	8.72
JS - 5	5.23	2.50	8.400	9.11
JS - 6	5.08	2.51	17.400	11.37
JS - 7	5.14	2.50	33.000	10.93

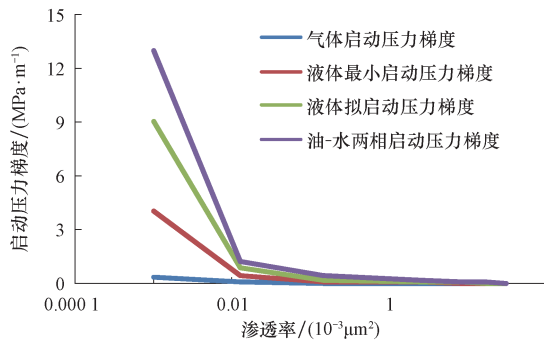


图 2 启动压力梯度随渗透率变化关系
Fig. 2 Relationship between threshold pressure gradient and permeability

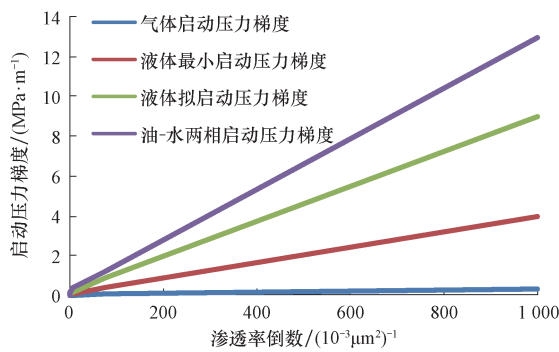


图 3 启动压力梯度随渗透率倒数变化关系
Fig. 3 Relationship between threshold pressure gradient and permeability reciprocal

在相同渗透率变化区间上,两相启动压力梯度下降的幅度分别为 11.803 MPa/m 和 1.133 MPa/m;气体启动压力梯度在渗透率超过 $0.15 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 以后变为 0 MPa/m。对比所测得 4 组启动压力梯度的数值,可知:气体启动压力梯度 < 液体最小启动压力梯度 < 液体拟启动压力梯度 < 油水两相启动压力梯度,油水两相的启动压力梯度要高于单相的启动压力梯度。图 3 表明,启动压力梯度随着渗透率倒数的增加而呈现线性增加。根据表 2,气体、液体的启动压力梯度和渗透率倒数的相关性关系都较好,相关系数都在 0.95 以上。因此,根据这种线性关系,可以制作某区域渗透率与启动压力梯度关系图版,这样就可以在图版上很方

便地查知某渗透率储层对应的启动压力梯度大小。

通过将本次实验测试的拟启动压力梯度的数值与文献中相比,在相同渗透率情况下,如果忽略储层物性的差别,本实验结果要比文献中的结果低了 1~2 个数量级,尤其对于低渗和特低渗储层测试结果,差别就更大,甚至超过两个数量级,而按照文献中的测定结果进行反算注入压力,一般得到的注入压力值都较高,而实际上在低注入压力下流体就已经被动用了。按照本次测定结果进行反算注入压力,得到的值比文献中反算值低了很多,而且现场在该注入压力下已经动用储层流体。可见,本方法测定结果更加接近于地层启动压力真实值,而且该方法考虑的更全面,测定结果更准确,测定精度也更高。

在测试过程中,除拟启动压力梯度外,其余 3 种启动压力梯度都是在精确模拟地层条件下完成的,测定结果具有较高的参考价值。对于实际的油藏,是油水共存的,因此在精确模拟地层条件下所测得油水两相启动压力梯度具有一定的参考价值。

5 结论

1) 采用瞬间动用法测试最小启动压力梯度,由于没有考虑压力传递缓慢带来的实验误差而导致结果偏高;两端压力平衡法由于影响因素较多,测定结果的精确度不高,而且耗时较长。

2) 采用“压差-流量法”测定拟启动压力梯度,在恒定围压模式下,测定结果往往偏大;在定净围压模式下,测定结果较为可靠,但恒流量注入测试方式较不经济,恒压注入流体实验方法较为可行。

3) 设计了启动压力梯度的一体化流程并制定了“非稳态动用-压力平衡法”实验方法。该方法通过给出一定平衡时间消除压力传递缓慢带来的实验误差,高精度仪表的应用保证实验结果的准确性,严格模拟地层条件保证了测定结果的真实性,而且具有更大的测定范围,可以实现“压差-流量法”实验点测定最佳实现方式。

表 2 启动压力梯度随渗透率参数的变化关系

Table 2 Relationship between threshold pressure gradient and permeability

项目	与 K (渗透率) 的相关性关系		与 $1/K$ 的相关性关系	
	拟合公式	相关系数	拟合公式	相关系数
气体启动压力梯度	$\lambda = -0.026\ 0 \ln K + 0.046\ 5$	0.702 7	$\lambda = 0.000\ 3/K + 0.010\ 4$	0.957 8
液体最小启动压力梯度	$\lambda = 0.019\ 8 K^{-0.783\ 0}$	0.851 2	$\lambda = 0.004\ 0/K + 0.027\ 0$	0.999 7
液体拟启动压力梯度	$\lambda = 0.028\ 0 K^{-0.882\ 0}$	0.842 1	$\lambda = 0.008\ 9/K + 0.062\ 5$	0.999 6
油-水两相启动压力梯度	$\lambda = 0.119\ 2 K^{-0.662\ 0}$	0.931 0	$\lambda = 0.012\ 9/K + 0.126\ 2$	0.999 4

4) 利用本文设计流程和方法针对吐哈油田岩心开展研究,测定结果符合预期。“非稳态动用-压力平衡法”可以推广到启动压力梯度的室内测试中。

参 考 文 献

- [1] 胡勇. 气体渗流启动压力实验测试及应用[J]. 天然气工业, 2010, 30(11): 48-50.
Hu Yong. Experiment and application of threshold pressure for gas flow[J]. Natural Gas Industry, 2010, 30(11): 48-50.
- [2] Thomas L K, Katz D L, Tek M R. Threshold pressure phenomena in porous media[J]. SPE Journal, 1968, 8(2): 174-184.
- [3] 王晓琴, 吴聚, 冉艳, 等. 非线性渗流对异常高压气藏产能的影响[J]. 岩性油气藏, 2012, 24(4): 125-128.
Wang Xiaoqin, Wu Ju, Ran Yan, et al. Influence of non-linear flow on productivity of abnormal high pressure gas reservoir[J]. Lithologic Reservoirs, 2012, 24(4): 125-128.
- [4] 柯文丽, 汪伟英, 游艺, 等. 非线性渗流启动压力梯度确定方法研究[J]. 石油化工应用, 2013, 32(2): 1-5.
Ke Wenli, Wang Weiying, You Yi, et al. Research of non-linear seepage start-up pressure gradient determine method [J]. Petrochemical Industry Application, 2013, 32(2): 1-5.
- [5] 陈志明, 蔡雨桐, 刘冰. 低渗透油藏启动压力梯度的研究方法[J]. 石油化工应用, 2012, 31(7): 7-10.
Chen Zhiming, Cai Yutong, Liu Bing. Research methods of studying starting pressure gradient for low permeability reservoir[J]. Petrochemical Industry Application, 2012, 31(7): 7-10.
- [6] 李南星, 刘林玉, 郑锐, 等. 鄂尔多斯盆地镇泾地区超低渗透储层评价[J]. 岩性油气藏, 2011, 23(2): 41-45.
Li Nanxing, Liu Linyu, Zheng Rui, et al. Super-low permeability reservoir evaluation in Zhenjing area, Ordos Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2011, 23(2): 41-45.
- [7] 张代燕, 王子强, 王殿生, 等. 低渗透油藏最小启动压力梯度实验研究[J]. 新疆地质, 2011, 29(1): 106-109.
Zhang Daiyan, Wang Ziqiang, Wang Diansheng, et al. An experiment study on measuring minimum starting pressure for low permeability [J]. Xinjiang Geology, 2011, 29(1): 106-109.
- [8] 杨秋莲, 李爱琴, 孙燕妮, 等. 超低渗透储层分类方法探讨[J]. 岩性油气藏, 2007, 19(4): 51-56.
Yang Qiulian, Li Aiqin, Sun Yanni, et al. Classification method for extra-low permeability reservoir [J]. Lithologic Reservoirs, 2007, 19(4): 51-56.
- [9] 谢晓庆, 张贤松, 张凤久, 等. 薄层低品位油藏孔隙结构及渗流特征[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2013, 40(1): 34-39.
Xie Xiaoqiang, Zhang Xiansong, Chen Minfeng. Experimental study of Lamellate low grade reservoir start pressure grade[J]. Petroleum Geology and Engineering, 2011, 25(3): 97-99.
- [10] 吕成远, 王建, 孙志刚. 低渗透砂岩油藏渗流启动压力梯度实验研究[J]. 石油勘探与开发, 2002, 29(2): 86-89.
Lyu Chengyuan, Wang Jian, Sun Zhigang. An experimental study on starting pressure gradient of fluids flow in low permeability sandstone porous media[J]. Petroleum Exploration and Development, 2002, 29(2): 86-89.
- [11] 李爱芬, 张少辉, 刘敏, 等. 一种测定低渗透油藏启动压力的新方法[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2008, 32(1): 68-71.
Li Aifen, Zhang Shaohui, Liu Min, et al. A new method of measuring starting pressure for low permeability reservoir[J]. Journal of China University of Petroleum, 2008, 32(1): 68-71.
- [12] 李爱芬. 特低渗透油藏渗流特征实验研究[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2003, 23(2): 35-39.
Li Aifen. Experimental study on the percolation characteristic of extra low-permeability reservoir [J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2003, 23(2): 35-39.
- [13] 李永寿, 郑华, 鄢宇杰, 等. 超低渗透油藏启动压力梯度实验研究[J]. 新疆石油天然气, 2012, 8(4): 81-85.
Li Yongshou, Zheng Hua, Yan Yujie, et al. An experimental study on starting pressure gradient in Ultra-low permeability Reservoirs [J]. Xinjiang Oil & Gas, 2012, 8(4): 81-85.
- [14] 李善鹏, 吴凯, 方艳兵. 特低渗透油藏启动压力现象研究—以侯市地区为例[J]. 岩性油气藏, 2009, 21(1): 125-127.
Lik Shanpeng, Wu Kai, Fang Yanbing. Study on the starting pressure phenomenon in ultra-low permeability reservoir: An example from Houshi area [J]. Lithologic Reservoirs, 2009, 21(1): 125-127.
- [15] 王杨, 杨胜来, 吴彬, 等. 大庆特低渗透砂岩单相水启动压力梯度实验研究[J]. 复杂油气藏, 2010, 3(1): 62-65.
Wang Yang, Yang Shenglai, Wu Bin, et al. Experimental research of single phase water on threshold pressure gradient of ultra-low permeability sandstone cores of Daqing Oil field [J]. Complex Hydrocarbon Reservoirs, 2010, 3(1): 62-65.
- [16] 杨琼, 聂孟喜, 宋付权. 低渗透砂岩渗流启动压力梯度[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2004, 44(12): 1650-1652.
Yang Qiong, Nie Mengxi, Song Fuqua. starting pressure gradient of fluids flow in low permeability sandstone porous media [J]. Journal of Tsinghua University (Science & Technology), 2004, 44(12): 1650-1652.
- [17] 宋付权, 刘慈群, 吴柏志. 启动压力梯度的不稳定快速测量[J]. 石油学报, 2001, 22(3): 67-70.
Song Fuqua, Liu Ciqun, Wu Bozhi. The fast transient measurement of threshold pressure gradient [J]. Acta Petrolei Sinica, 2001, 22(3): 67-70.
- [18] 谢全, 何顺利, 焦春艳, 等. 超低渗透储层饱和/非饱和渗流启动压力梯度实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(增1): 3129-3134.
Xie Quan, He Shunli, Jiao Chunyan, et al. Experimental investigation on threshold pressure gradient in saturated/unsaturated flows in Ultra-low permeability Reservoirs [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(supp. 1): 3129-3134.
- [19] 吴凡, 孙黎娟, 乔国安, 等. 岩心启动压力梯度测定实验条件优选[J]. 河南石油, 2006, 20(3): 79-80.
Wu Fan, Sun Lijuan, Qiao Guoan, et al. The Optimal selection of the conditions on testing core starting pressure gradient [J]. Henan Petroleum, 2006, 20(3): 79-80.
- [20] 宁丽华. 稠油拟启动压力梯度测定实验方法及应用[J]. 石油化工高等学校学报, 2011, 24(1): 59-64.

- ting ability of forming fracture network in shale reservoir [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(4): 947–954.
- [14] Riley P, Tikoff B, Murray A B. Quantification of fracture networks in non-layered, massive rock using synthetic and natural data sets [J]. Tectonophysics, 2011, 505: 44–56.
- [15] 侯冰, 陈勉, 李志猛, 等. 页岩储集层水力裂缝网络扩展规模评价方法 [J]. 石油勘探与开发, 2014, 41(6): 1–6.
- Hou Bing, Chen Mian, Li Zhimeng, et al. Evaluation of the propagation area of a hydraulic fracture network in shale gas reservoirs [J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(6): 1–6.
- [16] Balzarini M, Nicula S, Mattiello D, et al. Quantification and description of fracture network by MRI image analysis [J]. Magnetic Resonance Imaging, 2001, 19: 539–541.
- [17] Conny Z, Enrique G, Paul D, et al. Fracture network evaluation program (FraNEP): A software for analyzing 2D fracture trace-line maps [J]. Computers & Geosciences, 2003, 60: 11–22.
- [18] 耿飞, 解建光, 钱春香. 图像分析技术对混凝土裂缝的定量评价 [J]. 混凝土, 2005, 5: 78–82.
- Geng Fei, Xie Jianguang, Qian Chunxiang. Image analysis technique for quantitative evaluation of cracks in concrete [J]. Concrete, 2005, 5: 78–82.
- [19] 朱华, 姬翠翠. 分形理论及其应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2011: 37–42.
- Zhu Hua, Ji Cuicui. Fractal theory and its application [M]. Beijing, Science Press, 2011: 37–42.
- [20] 廉黎明, 秦积舜, 杨思玉, 等. 水平井渗流模型分析评价及发展方向 [J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(6): 821–826.
- Lian Limin, Qin Jishun, Yang Siyu, et al. Analysis and evaluation on horizontal well seepage models and their developing trends [J]. Oil & Gas geology, 2013, 34(6): 821–826.
- [21] 张凤喜, 吴晓东, 隋先富, 等. 基于电模拟实验的低渗透油藏压裂水平井产能研究 [J]. 特种油气藏, 2009, 16(2): 90–95.
- Zhang Fengxi, Wu Xiaodong, Sui Xianfu, et al. Study on fractured horizontal well productivity for low-permeability reservoirs based on electric analogy [J]. Special Oil and Gas Reservoirs, 2009, 16(2): 90–95.

(编辑 张亚雄)

(上接第180页)

- Ning Lihua. Experimental method and its application of threshold pressure gradient of Heavy Oil in porous media [J]. Journal of Petrochemical Universities, 2011, 24(1): 59–64.
- [21] 熊伟, 雷群, 刘先贵, 等. 低渗透油藏拟启动压力梯度 [J]. 石油勘探与开发, 2009, 36(2): 232–236.
- Xiong Wei, Lei Qun, Liu Xiangui, et al. Pseudo threshold pressure gradient to flow for low permeability reservoirs [J]. Petroleum Exploration and Development, 2009, 36(2): 232–235.
- [22] 郝斐, 程林松, 李春兰, 等. 特低渗透油藏启动压力梯度研究 [J]. 西南石油学院学报, 2006, 28(6): 29–33.
- Hao Fei, Cheng Linsong, Li Chunlan, et al. Study of Starting pressure gradient in ultra-low permeability reservoir [J]. Journal of Southwest Petroleum Institute, 2006, 28(6): 29–32.
- [23] 许建红, 程林松, 周颖, 等. 一种求解低渗透油藏启动压力梯度的新方法 [J]. 石油勘探与开发, 2007, 34(5): 594–597.
- Xu Jianhong, Cheng Linsong, Zhou Ying, et al. A new method for calculating kickoff pressure gradient in low permeability reservoirs [J]. Petroleum Exploration and Development, 2007, 34(5): 594–597.
- [24] 汪全林, 唐海, 吕栋梁, 等. 低渗透油藏启动压力梯度实验研究 [J]. 油气地质与采收率, 2011, 18(1): 97–101.
- Wang Quanlin, Tang Hai, Lyu Dongliang, et al. An experimental study on threshold pressure gradient in low permeability reservoirs [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2011, 18(1): 97–101.
- [25] 李忠兴, 韩洪宝, 程林松, 等. 特低渗透油藏启动压力梯度新的求解方法及应用 [J]. 石油勘探与开发, 2004, 31(3): 107–109.
- Li Zhongxing, Han Hongbao, Cheng Linsong, et al. A new solution and application of starting pressure gradient in ultra-low permeability reservoir [J]. Petroleum Exploration and Development, 2004, 31(3): 107–109.
- [26] 彭春洋, 欧阳云丽, 柯文丽, 等. 低渗透油藏渗流启动压力梯度研究 [J]. 油气地球物理, 2012, 10(1): 64–66.
- Peng Chunyang, Ouyang Yunli, Ke Wenli, et al. The study of actuating pressure gradient of the fluid flow in low permeable reservoir [J]. Petroleum Geophysics, 2012, 10(1): 64–66.

(编辑 张玉银)