文章编号:1673-5005(2008)01-0068-04

一种测定低渗油藏启动压力的新方法

李爱芬, 张少辉, 刘 敏, 王伟刚, 张 磊

(中国石油大学 石油工程学院,山东 东营 257061)

摘要:低渗油藏孔隙细小,渗流不符合达西定律,流体在其中流动存在启动压力。根据低渗油藏渗流特点,设计了合理确定启动压力的测试方法。利用胜利油田天然低渗岩心、产出水及现场脱气原油配制的模拟油,测定了单相水及束缚水饱和度下油的启动压力及非线性渗流规律,回归得到了启动压力梯度与岩石气测渗透率和流体粘度比值的关系。结果表明,利用该测试方法能准确地测定低渗及特低渗岩心的启动压力;油、水的启动压力梯度与岩石气测渗透率和粘度的比值呈幂指数关系,且随渗透率与粘度比值的降低而迅速增加。

关键词:低渗油藏; 启动压力; 气测渗透率;流体粘度; 非线性渗流; 渗流规律

中图分类号:TE 312 **文献标识码**:A

A new method of measuring starting pressure for low permeability reservoir

LI Ai-fen, ZHANG Shao-hui, LIU Min, WANG Wei-gang, ZHANG Lei

(*College of Petroleum Engineering in China University of Petroleum, Dongying* 257061, *Shandong Province, China*)

Abstract: Because the pore and throat of low permeability reservoir are very small, so the fluid flow doesn't conform to Darcy law, and there is starting pressure for fluid flow. According to the characteristics of fluid flow in low permeability reservoir, a new experimental method of measuring starting pressure was designed. Using the natural low permeability reservoir rocks and formation water and oil from Shengli Oilfield, the starting pressure and non-linear flow laws of water and oil at irreducible water saturation were investigated. And the relationship of starting pressure and the ratio of gas permeability and fluid viscosity was regressed. The results show that the starting pressure of low and ultra-low permeability reservoirs can be determined by this experimental method. The relationship of starting pressure and the ratio of gas permeability and fluid viscosity can be described by power exponential function, and the starting pressure of water or oil at irreducible water saturation increases with the ratio of gas permeability and fluid viscosity decreasing.

Key words: low permeability reservoir; starting pressure; gas permeability; fluid viscosity; non-linear flow; flow laws

低渗油藏的孔隙尺寸很小,孔隙中的流体受到岩石壁面较强的作用力。黄延章[1]认为,孔隙中的流体分为边界层流体和体相流体,边界层流体受固体分子场作用,物性不同于体相流体; Alexander Pertsin 等[2]从理论上证明了圆柱孔隙中的流体存在密度剖面,越靠近壁面密度越高;徐绍良等[3]通过测定毛细管中不同压力梯度下的流量,证实了边界层厚度随压力梯度的增加而减小;杨正明等[4]用核磁共振方法测定了岩心中可动流体百分数,证明了岩心渗透率越高,可动流体百分数越大。渗流边界层是产生渗流启动压力和渗流曲线非线性段的主要原因。目前对启动压力梯度测定及描述的研究很少,多数是采用稳定法[6-8]即测定流速-压差法确定拟启动压力。吕成远等[9]首次用毛细管平衡法测定了岩心的最小启动压力,但对于特低渗岩心此法受到限制。笔者通过试验,建立一种比较完善的便

收稿日期:2007-09-10

基金项目:中石化股份公司科技攻关项目(P06074)

作者简介:李爱芬(1962-),女(汉族),山东安丘人,教授,博士,主要从事油气渗流、提高采收率等方面的研究及教学工作。

万方数据

于测定低渗-特低渗岩心启动压力及流速-压差关系的方法,并对启动压力的描述方法及低渗非线性渗流特征进行研究。

1　低渗油藏启动压力定义及渗流特点

岩石孔隙中当边界层流体的厚度与孔隙半径相近时,流体开始流动时将存在启动压力梯度(岩心两端压差与长度的比值)。启动压力梯度与孔隙直径成反比。随岩心两端压差增加,孔隙中参与流动的流体量增加,参与流动的孔隙数量也增加。渗流速度与压力梯度的关系如图 1 所示。图中 A 点对应最小启动压力梯度,压力梯度高于此点流体才开始流动;B 点为拟启动压力梯度,为直线段的延长线与横坐标的交点;C 点为临界压力梯度,压力梯度高于此点流体的流动符合达西定律。

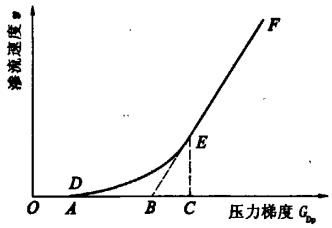

图 1　典型非达西渗流曲线示意图

2　启动压力测定方法

2.1　试验流程

建立了一种新的同时测定启动压力及流速-压差关系的方法,即"毛细管平衡法"[9]与"稳态法"相结合的方法(与毛管平衡法的不同在于用汞柱压差计记录上游压力,可使渗透率测量范围大大增加),如图 2 所示。

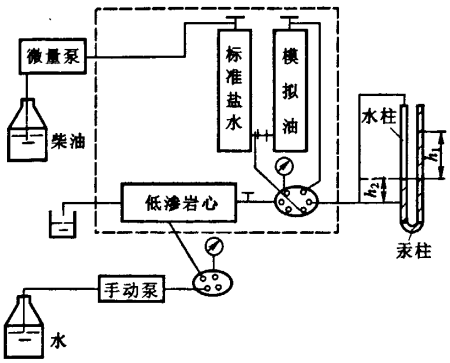

图 2　启动压力及流速-压差测定原理

图中虚线部分放在恒温箱中,泵的排量及压力点的测试通过计算机控制与记录。最小启动压力梯度用"毛细管平衡法"获得,流速-压差曲线由"稳态法"获得。

2.2　试验条件及步骤

试验温度为 50 ℃;试验用原油由胜利油田某低渗区块的脱气原油配制而成,50 ℃下粘度为 2 mPa·s;试验用水为同一区块井口产出水,矿化度 18 g/L,50 ℃下粘度为 0.63 mPa·s,19 ~ 20 ℃下粘度为 1.3 ~ 1.2 mPa·s。

试验步骤如下:

(1)水相启动压力及流速-压差测定。岩心(直径 2.5 cm)洗油烘干后气测渗透率,抽空饱和地层水。以 0.005 mL/min 的速度缓慢向岩心注入地层水,待岩心出口端处液面开始流动时,关闭六通阀上的进液开关,记录不同时刻汞柱压差计上的液柱高度 h_1 和 h_2,直至液柱高度稳定,由此计算岩心的启动压力及启动压力梯度。此后,调整泵的排量分别为 0.01,0.02,0.04,0.06,0.08,0.1,0.2,0.4,0.6 mL/min,每一流量下,待岩心两端压力稳定后记录压差、流量,计算每一流量下对应的流速(流量与岩心横截面积比值)绘制流速-压差关系曲线。

(2)束缚水饱和度下油的启动压力及流速-压差测定。岩心 100% 饱和水,开始以 0.01 mL/min 的速度用油驱替水至驱出水量不再增加,然后加大排量驱至地层条件下的束缚水饱和度(同一油藏岩心的最高油驱压力相同),停泵,卸掉岩心上游压力,恒温状态下老化 24 h;以 0.005 mL/min 的速度缓慢向岩心注模拟油,待岩心出口端处液面流动时,关闭六通阀上游的进液开关,记录不同时刻汞柱压差计上的液柱高度 h_1 和 h_2,直至液柱高度稳定,由此计算岩心的启动压力及启动压力梯度。之后用与步骤(1)相同的方法测定油的流速-压差关系(最高注入压力小于造束缚水时的注入压力)。

3　启动压力及流速-压差测定结果

3.1　单相水的启动压力及流速-压差关系

在 19 ~ 20 ℃下用地层水测定了 16 块气测渗透率为(0.02 ~ 5.26) × 10^{-3} μm^2 岩心的启动压力梯度,水相最小启动压力与岩石气测渗透率和水的粘度比值(k_g/μ_w)的关系见表 1 和图 3。测定了其中 7 块岩心的流速-压差关系,得到的相应的流速-压力梯度曲线见图 4。

万方数据

表 1 不同渗透率岩心水相启动压力测试结果

岩心序号	气测渗透率 k_g /10^{-3} μm²	岩心长度 L/cm	最小启动压力 p_{wmin} /MPa	稳定时间 t/h	最小启动压力梯度 G_{Dp} /(kPa · cm⁻¹)
1	0.021	5.454	0.0794	56	14.551
2	0.049	6.39	0.0781	57.7	12.218
3	0.305	5.666	0.0456	68.83	8.969
4	0.357	6.606	0.0352	124.58	5.324
5	0.439	5.816	0.0081	116.33	1.39
6	0.461	7.19	0.0158	84.8	1.34
7	0.542	6.378	0.0488	71.83	1.283
8	0.556	4.516	0.0016	104.37	0.345
9	1.840	5.588	0.0027	85.08	0.478
10	3.684	4.658	0.0049	84.49	0.452
11	0.087	4.558	0.0474	120	10.337
12	0.177	4.746	0.0592	152.5	9.467
13	0.370	4.518	0.0583	71.83	5.234
14	3.556	5.756	0.0058	34.57	0.448
15	4.123	5.37	0.0012	96	0.22
16	5.257	5.824	0.0010	72	0.17

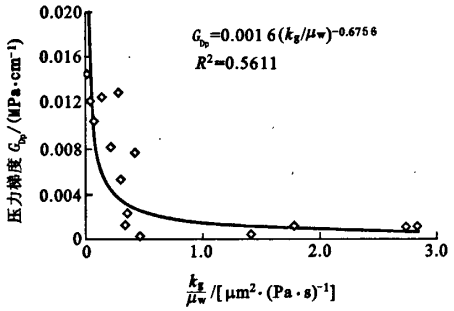

图 3 水相最小启动压力梯度与 k_g/μ_w 的关系

由图 3 可以看出，k_g/μ_w 越小即岩石的渗透率越小，启动压力梯度就越大。原因在于岩石喉道越细，固体表面对边界层流体作用力越大，流体流动所需克服的阻力越大。当 k_g/μ_w 小于 0.5 μm²/(Pa·s)或岩石气测渗透率小于 0.5×10^{-3} μm² 时，随 k_g/μ_w 降低，启动压力梯度迅速增加。

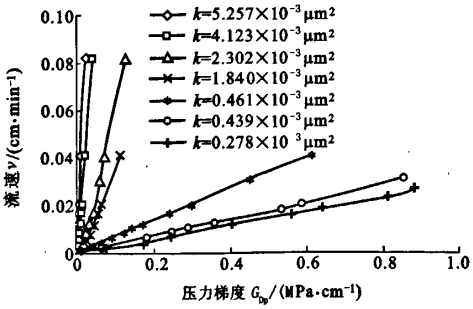

图 4 水的流速-压差关系曲线

由图 4 可以看出，当压力梯度较小时，不同渗透率的岩心的流速-压力梯度曲线都存在上凹的非线性段，非线性段可用 $v = aG_{Dp}^2 + bG_{Dp} + c$ 表示；当压力梯度大到一定值后变为直线，$v = \frac{k_e}{\mu}(G_{Dp} - B)$，其中 k_e 为有效渗透率。岩心气测渗透率越低，曲线越向右下方偏移，岩心非线性渗流段也越长。这是由于渗透率越低，岩石孔隙越小，在同样的压差下流速越低，使较细孔隙中的流体全部参与流动需要的压力梯度越大，因此曲线右移。

3.2 束缚水饱和度下油相启动压力及流速-压差关系

用地层水及模拟油测定了 7 块岩心在束缚水饱和度下油相的启动压力及流速-压差关系。启动压力试验结果见表 2 及图 5，不同渗透率岩心的流速-压差关系见图 6。

表 2 束缚水饱和度下油相启动压力(μ_o =2 mPa · s)

岩心号	气测渗透率 k_g/(10^{-3} μm²)	岩心长度 L/cm	最小启动压力 p_{omin}/MPa
1	0.278	5.666	0.223
2	0.556	4.516	0.0485
3	1.762	5.062	0.045
4	1.840	4.910	0.031
5	2.302	5.756	0.019
6	3.5559	5.588	0.01575
7	4.1229	5.37	0.012

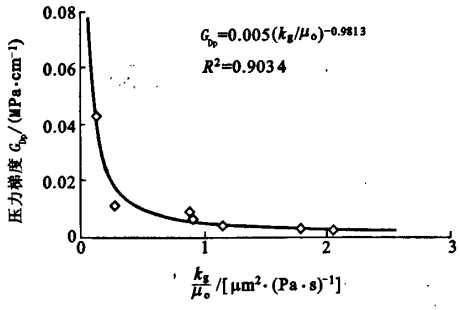

图 5 束缚水饱和度下油相最小启动压力梯度与 k_g/μ_o 的关系

由图 5 看出，束缚水饱和度下油相的最小启动压力梯度随 k_g/μ_o 的降低而增加，当 k_g/μ_o <0.5 时，启动压力梯度迅速增加。

由束缚水饱和度下油的流速-压差关系曲线(图 6)同样可以看出，低压力梯度下存在非线性渗流段，且随渗透率的降低，曲线右移，非线性渗流段增长。因为所有孔隙中的流体全部参与流动后，流速-压差才呈现线性关系，岩心渗透率越低，使所有孔隙中的流体参与流动所需的压力越大，因此非线性段加长。

比较图 3,5 可以看出，束缚水饱和度下油相的最小启动压力梯度高于纯水相。启动压力是使流体克服岩石的引力而开始流动的外加压力，其影响因素复杂，流体粘度越大、岩石渗透率越低，流体开始流动时需施加的压力越大，即启动压力越大。

万方数据

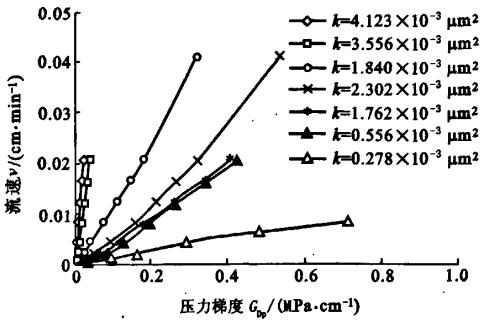

图 6　束缚水饱和度下油相的流速-压差关系曲线

4　结　论

(1)低渗岩心中水及油的启动压力梯度与气测渗透率和流体粘度的比值呈幂函数关系,当 $k_g/\mu > 0.5\ \mu m^2/(Pa \cdot s)$时,启动压力梯度很小;当 $k_g/\mu < 0.5\ \mu m^2/(Pa \cdot s)$时,随岩石渗透率的降低、流体粘度的增加,启动压力梯度迅速增加。

(2)随渗透率的降低,流速-压差曲线向右移动,并且曲线的非线性段延长。

(3)束缚水饱和度下油的启动压力梯度明显高于水的启动压力梯度。

参考文献:

[1]　黄延章.低渗透油层渗流机理[M].北京:石油工业出版社,1998.

[2]　ALEXANDER Pertsin, MICHEAL Grunze. Water-graphite interaction and behavior of water near the graphite surface [J]. The Journal of Physics Chemistry B,2004,108:1 357-1 364.

[3]　徐绍良,岳湘安,侯吉瑞,等.边界层流体对低渗透油藏渗流特性的影响[J].西安石油大学学报:自然科学版,2007,22(2):26-28.
XU Shao-liang, YUE Xiang-an, HOU Ji-rui, et al. The affection of bound layer liquid to flowing characteristic of low permeable reservoirs[J]. Journal of Xi'an Shiyou University(Natural Science Edition),2007,22(2):26-28.

[4]　杨正明,苗盛,刘先贵,等.特低渗透油藏可动流体百分数参数及其应用[J].西安石油大学学报:自然科学版,2007,22(2):96-99.
YANG Zheng-ming, MIAO Sheng, LIU Xian-gui, et al. The studying and application of the percent parameter of flowing liquid of the very low permeable reservoirs[J]. Journal of Xi'an Shiyou University(Natural Science Edition), 2007,22(2):96-99.

[5]　黄延章.低渗透油层非线性渗流特征[J].特种油气藏,1997, 4(1):9-14.
HUANG Yan-zhang. Nonlinear percolation feature in low permeability reservoir[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 1997, 4(1):9-14.

[6]　孙黎娟,吴凡,赵卫华,等.油藏启动压力规律的研究及应用[J].断块油气田,1998,5(5):30-33.
SUN Li-juan, WU Fan, ZHAO Wei-hua, et al. The study and application of reservoir start-up pressure[J]. Fault-Block Oil & Gas Field,1998,5(5):30-33.

[7]　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 Li-juan, QIAO Guo-an, et al. The optimise of experimental condition for measuring threshold pressure gradient[J]. Henan Petroleum,2006,20(3):79-80.

[8]　韩洪宝,程林松,张明禄,等.特低渗油藏考虑启动压力梯度的物理模拟及数值模拟方法[J].石油大学学报:自然科学版,2004,28(6):49-53.
HAN Hong-bao, CHENG Lin-song, ZHANG Ming-lu, et al. Physical simulation and numerical simulation of ultra-low permeability reservoir in consideration of starting pressure gradient[J]. Journal of the University of Petroleum, China(Edition of Natural Science),2004,28(6): 49-53.

[9]　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):86-88.
LÜ Cheng-yuan, WANG Jian, SUN Zhi-gang. An experimental study on starting pressure gradient of fluids flow in low permeability sandstone porous media[J]. Petroleum Exploration and Development,2002,29(2):86-88.

(编辑　李志芬)

(上接第 63 页)

[5]　黄建东,孙守港,陈宗义,等.低渗透油田注空气提高采收率技术[J].油气地质与采收率,2001,8(3):79-81.
HUANG Jian-dong, SUN Shou-gang, CHEN Zong-yi, et al. Air injection technique for IOR from low permeability oil reservoir[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2001,8(3):79-81.

[6]　王杰祥,张琪,李爱山,等.注空气驱油室内实验研究[J].石油大学学报:自然科学版,2003,27(4):73-75.
WANG Jie-xiang, ZHANG Qi, LI Ai-shan, et al. Laboratary experiment on efficiency of air injection displacement[J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 2003,27(4):73-75.

[7]　GREAVES M. Air injection technique(LTO process) for IOR from light oil reservoirs: oxidation rate and displacement studies[R]. SPE 40062,1998.

[8]　MOORE R G. A guide to high pressure air injection (HPAI) based oil recovery[R]. SPE 75207,2002.

[9]　REN S R, GREAVES M. Air injection LTO process: an IOR technique for light-oil reservoirs[R]. SPE 57005, 2002.

(编辑　李志芬)

万方数据