

低渗油藏非达西流启动压力梯度的确定方法

甘庆明 成 珍 成绥民

(西安石油学院资源与石油工程学院 陕西西安 710065)

摘要 针对低渗透油层低速非达西流启动压力梯度的 6 类确定方法进行了全面的论述和评价。准确地确定低渗油藏的启动压力梯度,对搞好低渗透油田的开发具有重要意义。

关键词 低渗透油藏 低速非达西流 启动压力梯度

随着我国石油工业的发展,将有更多的低渗透油田投入开发。大量的室内模拟实验和矿场试验^[1~3]表明,流体在低渗透油藏中的低速渗流不再符合达西定律,而是具有启动压力梯度。最早提出启动压力梯度值概念的是 1951 年前苏联的 B. A. 费劳林^[1],他认为只有当实际压力梯度大于某一临界值时,流动才能发生,此临界值称为启动压力梯度。国内最早进行实验研究的是西安石油学院闫庆来等人^[2],试井方面最早研究的是刘慈群^[6~10]、冯文光^[11]及程时清^[12]等人。本文对确定低渗油藏非达西流启动压力梯度的方法进行了全面的论述,准确地确定低渗油藏的启动压力梯度,对搞好低渗透油田的开发具有重要意义。

室内实验方法

闫庆来等^[2]进行了流体(蒸馏水、低浓度盐水和模拟原油)通过不同渗透率的天然岩心和人工胶结岩心的流动实验,实验证明低渗透储层的渗流呈非达西渗流特征,存在最低启动压力梯度 L 、不稳定流 A (平均启动压力梯度)和稳定流的最高启动压力梯度 H 呈现达西流(见图 1)。宋付权、刘慈群等通过室内岩心实验^[4,5]求取低渗岩心的启动压力梯度。

1. 测量稳态压力求取低渗岩心的启动压力梯度

在初始时刻将饱和油的岩心处于高压 p_i 下,然后岩心一端打开,累积产油 Q_c 后关闭,待压力稳定

后,测量岩心开口端或封闭端压力。若已知岩心物性参数和一端压力,因

$$Q_c = \int_0^L (p_i - p) \phi C_r A dx \quad (1)$$

式中: A ——岩心横截面积, m^2 ;

C_r ——综合压缩系数, Pa^{-1} ;

p_i ——原始地层压力, Pa ;

Q_c ——累积产油量, m^3 。

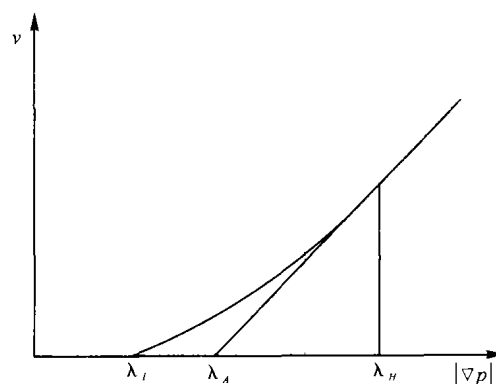


图1 低渗非达西渗流过程示意图

用采油端压力计算启动压力梯度的公式为

$$= \frac{2}{L^2} \left| \frac{Q_c}{\phi C_r A} - p_o L \right| \quad (2)$$

其中

$$p_o = p_i - p_o$$

式中: L ——岩心长度, m ;

p_o ——岩心采油端压力, Pa ;

ϕ ——孔隙度, f 。

用封闭端稳态压力计算启动压力梯度的公式为

$$= \frac{2}{3L^2} \left| \frac{Q_c}{\phi C_r A} - p_o L \right| \quad (3)$$

[作者简介] 甘庆明,男,1977年8月出生,1998年毕业于大庆石油学院,现为西安石油学院硕士研究生,主要从事低渗油藏的试井解释工作。

其中

$$p_s = p_i - p_s$$

式中: p_s ——岩心封闭端压力, Pa。

若岩心物性参数未知, 用两次采油(累积产量分别为 Q_{c1} 、 Q_{c2}) 和两次稳定测压 (p_{o1} 、 p_{o2}) 计算启动压力梯度的公式为

$$= \frac{2}{L} \frac{Q_{c1} p_{o2} - Q_{c2} p_{o1}}{Q_{c2}} = \frac{2}{L} (p_{o2} - p_{o1}) \quad (4)$$

若累积产油 Q_c 后关闭, 压力稳定后测量岩心两端的压力 p_o 、 p_s ($p_o < p_s$), 则启动压力梯度为

$$= (p_s - p_o) / L \quad (5)$$

2. 测量不稳定渗流压力求取低渗岩心的启动压力梯度

该方法是在初始时刻将岩心在高压下饱和原油, 一端封闭并装入测压计, 待系统压力平衡且稳定时, 将岩心另一端放空至某一压力值(例如标准大气压), 连续测量封闭端压力变化, 直至系统达到稳定状态, 根据不稳定压力曲线和稳态时的压差, 求出岩心的启动压力梯度。

数值实验方法

刘曰武等^[6]研究利用 Lattice Boltzmann 方法, 从细观渗流机制出发, 将细观机制研究结果应用于宏观研究, 从而在细观和宏观之间建立了一定的必然联系。

首先根据低渗透多孔介质孔隙大小符合 Maxwell 分布的特点, 建立低渗透多孔介质孔隙结构的数值化模型, 然后选择优越的 Lattice Boltzmann 方法作为首选的计算方法。

确定启动压力梯度的方法如下: 根据油田岩心的毛管压力曲线或孔喉分布曲线, 建立 LB 模型计算的多孔介质数值结构, 进行 LB 方法的模拟计算, 得到流量—压力梯度模拟曲线, 将模拟曲线的直线段部分延长并与压力梯度轴相交, 得到交点的值即为无量纲启动压力梯度的值。通过模拟计算结果与矿场实际压力梯度结果的对比获得无量纲量与有量纲量之间的比例系数, 则可以得到该地层的启动压力梯度。

理论计算方法

孙明等^[7]给出了单向渗流和平面径向渗流时启

动压力梯度的理论计算公式。对于原油(属于塑性流体), 根据 Bingham 公式, 孔隙度、渗透率与毛管半径之间的关系以及塑性流体在毛管中的平均流速与毛管长度 l 、流动压差之间的关系为

$$q = \frac{kF}{\mu} \left[\frac{p}{l} - \frac{\tau_0}{3} \sqrt{\frac{\phi}{2k}} \right] \quad (6)$$

$$\vec{v} = \frac{k}{\phi \mu} \left[\frac{p}{l} - \frac{\tau_0}{3} \sqrt{\frac{\phi}{2k}} \right] \quad (7)$$

式中: τ_0 ——极限动切应力, g/cm²;

k ——有效渗透率, 10⁻³ μm²。

(6)、(7) 式即为低渗透油层中单向流体的渗透

规律。由 (6)、(7) 式可知, 当 $\frac{p}{l} > \frac{\tau_0}{3} \sqrt{\frac{\phi}{2k}}$ 时, 流体才发生流动。于是可得流体的启动压力梯度计算公式

$$= \frac{\tau_0}{3} \sqrt{\frac{\phi}{2k}}$$

在径向流情况下, (6) 式具有如下形式

$$q = \frac{2\pi k h}{\mu} \left[\frac{dp}{dr} - \frac{\tau_0}{3} \sqrt{\frac{\phi}{2k}} \right] \quad (8)$$

积分得

$$p = p_w + \frac{q \mu}{2 \pi k h} \ln \frac{r}{r_w} + \frac{\tau_0}{3} \sqrt{\frac{\phi}{2k}} (r - r_w) \quad (9)$$

于是, 启动压力梯度为

$$= \frac{\tau_0}{3} \sqrt{\frac{\phi}{2k}} (r - r_w) \quad (10)$$

生产分析方法

郑祥克等人^[8]根据 IPR 方程考虑油相存在启动压力, 用无因次量表达产量公式为

$$q_o(\cdot) = a_0 \frac{k_m}{\mu_{o.o}} dp - \frac{a_1}{\mu_{o.o}} \frac{k_m}{\mu_{o.o}} dp \quad (11)$$

因此, 若对 (11) 式分别求 1~4 阶导数, 再用泰勒原理展开取前 5 项, 则由于 $q_o(\cdot) = 0$, 然后对其进行 Vogel 无因次化, 得到流入动态关系式为

$$\frac{q_o}{q_{o,max}} = 1 + \frac{c_1}{d} \left(\frac{D_{wf}}{p_r} \right) + \frac{c_2}{d} \left(\frac{D_{wf}}{p_r} \right)^2 + \frac{c_3}{d} \left(\frac{D_{wf}}{p_r} \right)^3 + \frac{c_4}{d} \left(\frac{D_{wf}}{p_r} \right)^4 \quad (12)$$

其中

$$c_1 = - \{ q_o(\cdot) + (1 - \cdot) q_o(\cdot) + 1/2(1 - \cdot)^2 q_o'''(\cdot) + 1/6(1 - \cdot)^3 q_o^{(4)}(\cdot) \}$$

$$c_2 = \{1/2(1 - \alpha) q_o(\alpha) + 1/2(1 - \alpha) q_o'''(\alpha) + 1/4(1 - \alpha)^2 q_o^{(4)}(\alpha)\}$$

$$c_3 = -\{1/6 q_o'''(\alpha) + 1/6(1 - \alpha) q_o^{(4)}(\alpha)\}$$

$$c_4 = \{1/24 q_o^{(4)}(\alpha)\}$$

$$d = q_{o\max} = q_o(1) = (1 - \alpha) q_o(\alpha) + 1/2(1 - \alpha)^2 q_o(\alpha) + 1/6(1 - \alpha)^3 q_o'''(\alpha) + 1/24(1 - \alpha)^4 q_o^{(4)}(\alpha)$$

$q_o^{(n)}$ ($n=1, 2, 3, 4$) 按对 (11) 式求 1~4 阶导数式计算。

只要知道流度函数和井底流压, 则可直接由多个生产数据用 IPR 曲线拟合得到启动压力。

稳定试井方法

谭雷军等^[9]研究了通过稳定试井求启动压力梯度的公式, 其基本数学模型为

$$\frac{d^2 p_D}{dr_D^2} + \frac{1}{r_D} \frac{dp_D}{dr_D} + \frac{D}{r_D} = 0 \quad (13)$$

$$\left. \frac{dp_D}{dr_D} \right|_{r_D=1} = -1 - D \quad (14)$$

$$p_D / r_D = r_{eD} = 0 \quad (15)$$

$$p_D / r_D = 1 = p_{wD} \quad (16)$$

式中: D ——无量纲启动压力梯度;

r_e ——供油半径, m。

求解上式得

$$p = (r_e - r_w) + \frac{1.842 \times 10^{-3} q_{sc} \mu B_o}{kh} \ln \frac{r_e}{r_w} \quad (17)$$

由 (17) 式知, p 与 q_{sc} 的关系曲线理论上应为一条不过坐标原点的直线, 即满足关系式

$$p = a q_{sc} + b \quad (18)$$

直线在压力坐标上的截距 b 即为启动压力梯度。

不稳定试井方法

1. 曲线拟合方法

低渗透油藏不稳定试井的基本模型^[6, 10~12]如下:

$$\text{控制方程: } \nabla^2 p_D + \frac{1}{r_D} = \frac{\partial p_D}{\partial t_D} \quad (19)$$

流动速度方程:

$$v = \begin{cases} 0 & |\nabla p| < \\ -\frac{k}{\mu} \nabla p \left(1 - \frac{1}{|\nabla p|} \right) & |\nabla p| \end{cases} \quad (20)$$

$$\text{初始条件: } p_D = 0 \quad (21)$$

$$\text{内边界条件: } C_D \frac{dp_D}{dt_D} - r_D \frac{\partial p_D}{\partial r_D} \bigg|_{r_D=1} = 1 + \quad (22)$$

$$\text{外边界条件: } p_D = 0 \quad (23)$$

利用低渗油藏含启动压力梯度的试井解释模型计算理论曲线, 与双对数图中的实测曲线相拟合, 便可得到启动压力梯度。

2. 用压恢资料求油藏启动压力梯度

宋付权等^[13]推导了用压恢资料求油藏启动压力梯度的公式。假定无限大油藏中一口垂直井, 井筒半径为 r_w , 介质各向同性, 孔隙度为 ϕ , 油层厚度为 h , 综合压缩系数为 C_t , 初始地层压力为 p_i , 油井开始生产累积产油 q_c 后关井至稳定。其稳态压力分布公式为

$$p_i - p = (R - r) \quad (24)$$

式中: R ——压力影响半径, m。

稳态时井底压差为

$$p_w = p_i - p_w = (R - r_w) \quad (25)$$

由质量守恒定律可得

$$\int_0^{t_p} q(t) B dt = 2 \int_{r_w}^R \phi C_t h (p_i - p) r dr \quad (26)$$

将 (24) 式代入 (26) 式并化简得

$$\frac{q_c B^2}{2 \phi C_t h} = \frac{1}{6} [(R - r_w)^3 + 3 r_w (R - r_w)^2] \quad (27)$$

$$\text{其中 } q_c = \int_0^{t_p} q(t) dt$$

由 (27) 式和 (25) 式得

$$\left| \frac{q_c B}{\phi C_t h} \right|^2 - r_w (p_w)^2 - \frac{(p_w)^3}{3} = 0 \quad (28)$$

解 (28) 式并考虑井筒体积 V_w 和表皮系数 S , 得启动压力梯度的计算公式

$$= \frac{\phi C_t h r_{we} (p_w)^2}{2 (q_c + V_w) B} \left[1 + \frac{\sqrt{4 (q_c + V_w) B}}{\sqrt{3} \phi C_t h r_{we}^2 (p_w)} \right] \quad (29)$$

其中 $V_w = r_w^2 h_w$ $r_{we} = r_w e^{-s}$

考虑到一般情况下, 当压力恢复至稳定时, $R \gg r_w$ 且忽略井筒体积, 则 (29) 式可简化为

$$= \left| \frac{\phi C_t h (p_w)^3}{3 q_c B} \right|^{\frac{1}{2}} \quad (30)$$

3. 数值试井方法

(20) 式是用试井分析模型描述低渗非达西流的

极好方法,其中反映非达西渗流特征的函数 f 模型如下

$$f(x) = \begin{cases} 1 - \sqrt{x} & x < 1 \\ 0 & x \geq 1 \end{cases} \quad (31)$$

渗流速度相应为

$$v = \begin{cases} -\frac{k}{\mu} \nabla p \left(1 - \sqrt{\frac{\nabla p}{p_0}} \right) & |\nabla p| > p_0 \\ 0 & |\nabla p| \leq p_0 \end{cases} \quad (32)$$

对于含压力梯度流动边界的求解,李凡华^[10]提出一种稳定的数值计算方法。无限大油藏差分方法有以下方程

$$p_{i-1,j} - \left(2 + \frac{r^2 e^{2r_i}}{C_D e^{2S} t_j} \right) p_{i,j} + p_{i+1,j} = -r^2 e^{r_i} S - \frac{r^2 e^{2r_i}}{C_D e^{2S} t_j} p_{i,j-1} \quad (33)$$

$$p_{i,0} = 0 \quad (34)$$

$$p_{0,j} - \left(4 + \frac{2r}{t_j} \right) p_{1,j} + p_{2,j} = -2r(1 + e^{-S}) - \frac{2r}{t_j} p_{1,j-1} \quad (35)$$

$$p_{j-1,j} - 4p_{j,j} = -2rR(t_j) e^{-S} \quad (36)$$

聂立新^[14]提出不需要考虑动边界的数值计算方法,针对图 1 给出 f 的数值模型为

$$f(x) = f(x, A, H) = \begin{cases} \frac{-Ax^2}{H} + \left(1 - \frac{2A}{H} \right) x & x \leq H \\ x - A & x > H \end{cases} \quad (37)$$

对模型进行数值求解得到

$$\frac{1}{r_{Di}} \left[f(p_{Di})^j + \frac{r_{Di} f(p_{Di})^j}{r_{Di+0.5} - r_{Di-0.5}} \right] - \left[\frac{p_{Di+1}^j - p_{Di}^j}{r_{Di+1} - r_{Di}} - \frac{p_{Di}^j - p_{Di-1}^j}{r_{Di} - r_{Di-1}} \right] = \frac{p_{Di}^j - p_{Di-1}^j}{t_{Dj} - t_{Dj-1}} \quad (38)$$

$$p_{Di}^0 = 0 \quad (39)$$

$$p_{wD}^j = p_{D0}^j \quad (40)$$

$$\frac{p_{D1}^j - p_{D0}^j}{r_{D1} - r_{D0}} = C_D \frac{p_{wD}^j - p_{wD}^{j-1}}{t_{Dj} - t_{Dj-1}} - (1 + A_D) \quad (41)$$

$$p_{Dn}^j = 0 \text{ 或 } p_{Dn-1}^j = p_{Dn}^j \quad (42)$$

件的限制。因而可能造成较大的数据误差;数值实验方法简便快捷、参数变化范围大,但是必须依赖于地层的孔喉分布规律和一定的对比实验;理论计算方法论证清晰、思路简练,但是在实用性方面存在明显的不足;生产分析方法简便快捷,但受生产数据的准确性影响,且必须提供井底流动压力和流度函数值;稳定试井方法提供了求解启动压力梯度的一种方法,但是在低渗地层中展开稳定试井往往是很困难的,因而该方法实用性较差;不稳定试井方法反映了油藏的动态变化规律,用不稳定试井方法确定的启动压力梯度具有积极的现实意义,但具体选用何种解释方法要针对具体情况分析选用。

参 考 文 献

- 1 A. T. 戈尔布诺夫. 异常油田开发. 北京:石油工业出版社, 1987
- 2 闫庆来,等. 低渗透油层中单相液体渗流特征的实验研究. 西安石油学院学报, 1990, 5(2)
- 3 中国石油天然气总公司开发生产局. 低渗透油田开发技术——全国低渗透油田开发技术座谈会论文集. 北京:石油工业出版社, 1994
- 4 宋付权,刘慈群. 低渗透油藏启动压力梯度的简单测量. 特种油气藏, 2000, 7(1)
- 5 宋付权,刘慈群,吴柏志. 启动压力梯度的不稳定快速测量. 石油学报, 2001, 22(3)
- 6 刘白武,丁振华,何凤珍. 确定低渗透油藏启动压力梯度的三种方法. 油气井测试, 2002, 11(4)
- 7 孙明,等. 低渗透油藏渗流启动压力理论计算方法. 河南石油, 1999, (4)
- 8 郑祥克,陶永建. IPR 方法确定启动压力的探索. 油气井测试, 2002, 11(6)
- 9 谭雷军,贾永禄,冯曦,钟孚勋. 低速非达西流启动压力梯度的确定. 油气井测试, 2000, 9(4)
- 10 李凡华,刘慈群. 含启动压力梯度的不定常渗流的压力动态分析. 油气井测试, 1997, 6(1)
- 11 冯文光,葛家理. 单一介质、双重介质中非达西低渗渗流问题. 石油勘探与开发, 1985, (1)
- 12 程时清,徐论勋,张德超. 低速非达西渗流试井典型曲线拟合法. 石油勘探与开发, 1996, 23(4)
- 13 宋付权,刘慈群,胡建国. 用压力恢复试井资料求油藏启动压力梯度. 油气井测试, 1999, 8(3)
- 14 聂立新. 低渗透油藏压力分析. 油气井测试, 2001, 10(6)

各种方法的评价

室内实验方法直观明了,可以直接进行渗流规律的研究,但是存在着 3 个缺点: 试验周期长,难以保证岩心处于地下时的自然状态, 受试验条

本文收稿日期:2003-02-28 编辑:穆立婷

WELL TESTING (YOUQING CESH)

Vol. 13 No. 3 (Serial No. 83) 2004

Abstracts

·Research of Theory & Method ·

Methods to Confirm the Starting Pressure Gradient for Low Permeability Reservoir Non-Darcy Flow. 2004(3) 13:1 ~ 4

Gan Qingming, Cheng Zhen, Cheng Suimin (Resource and Petroleum Engineering Institute of Xi'an Petroleum Institute)

The development for low permeability field will become one of the development emphasis for a quite long time from now. This paper systematically discusses and evaluates the starting pressure gradient of low permeability reservoir low speed non-darcy flow.

Key words: low permeability reservoir, low speed non-darcy flow, starting pressure gradient

A Study for Calculating Formation Pressure Using IPR Curves. 2004(3) 13:5 ~ 6

Zhang Zhifeng, Zhang Hong, Zhen Hongji, Xue Shituan, Zhao Guocai, Yu Runguo (No. 1 Production Factory, Qinghai Oilfield Sub-Company)

From IPR curves, using flow pressure and production at two different work conditions, a new method to get formation pressure has been developed, which has advantage features of being done without making pump to stop and small calculating errors on the middle or later development time of the oilfield. The social and economical benefit is reasonable.

Key words: IPR curves, formation pressure, flow pressure, production, study

Sample Method to Calculate Afterflow Rate of Down-Hole in Low Production and Low Pressure Wells. 2004(3) 13:7 ~ 8

Zhang Jie (Southwest Petroleum Institute), Li Cuinan, Cheng Yanling (Southwest Oil and Gas Field Company)

To low production and low pressure wells, low pressure makes liquid depth in bore hole to be low before it closed. While, after the well closed, slug flow when fluid around hole bottom flows to well makes testing data to show a long time of early period zone. For analyzing this kind of data accurately, the influence of slug flow should be considered. The paper develops a sample method to solve it based on the principle of material balance which is clear and applicable. The result can feed the need of testing analysis, especially suit for pre-process to test data at early and short time in low production and low pressure wells.

Key words: material balance, low production and low pressure, testing analysis

Using Genetic Algorithm to Analyze Well Test Data. 2004(3) 13:9 ~ 12

Zhang Dongli, Liu Xiangui, Liu Ciqun (Percolation Force Study Institute, China Scientific Department), Wang Wenqing (Research Institute, Jilin Oilfield)

The application of genetic algorithm on well test analysis is discussed. The multiple searching method is used for avoiding local extreme value problem and the implicit binary coding method is used to increase calculating velocity and reduce the storage. The algorithm is quick for auto-matching and high exact in result. The analysis result can also be combined with linear inverse method and used as the initial value of the latter method which can be easily used in well test interpretation in the oilfield.

Key words: genetic algorithm, well testing, interpretation, inversion

The Study and Application for Forecasting Individual Well Initial Production by Numerical Simulation. 2004(3) 13:13 ~ 15

Zhao Jun, Zheng Lihui (Logging Centre of Tarim Oilfield Company)

Comparing three forecasting methods with individual well initial production, it is thought that the numerical simulation method could consider many factors and actual situation. So, numerical simulation to forecast individual well initial productivity of Tarim oilfield has been formed and reservoir initial production numerical simulation software has been developed. By forecasting that of 19 wells or zones, the result coincided actual production rate very much.

Key words: numerical simulation, forecast, individual well, initial production, application

·Evaluation & Application ·

Determining Depth of Gas and Water Interface in Condensate Gas Reservoir Using Test Data. 2004(3) 13:16 ~ 17