

## 石油技术

# 确定低渗透油藏启动压力梯度的新方法

刘 杰<sup>1</sup> 赵秀娟<sup>1</sup> 廖新武<sup>1</sup> 柴世超<sup>1</sup> 郝振萍<sup>2</sup>

(中海石油(中国)有限公司天津分公司<sup>1</sup>,天津 300452;

中海石油(中国)有限公司深圳分公司<sup>2</sup>,深圳 518000)

**摘要** 以渗流理论为基础,运用稳态逐次替换法将整个渗流过程微分化,视每个微单元为稳定流动,并将适合于低渗透油藏的稳定产量公式代入每个微分单元,进行积分后,再结合物质平衡方程,最终求得启动压力梯度的理论计算公式。该方法摆脱了利用实验室求取启动压力梯度的传统方法,提出了一种运用产量和压力等生产数据的全新计算启动压力梯度的理论计算公式。同时运用该新方法对某低渗油田启动压力梯度进行了计算,并与实验室测得的数据进行对比。结果证实了新方法计算结果的合理性。

**关键词** 稳态逐次替换法 低渗透油藏 启动压力梯度 理论计算公式

**中图法分类号** TE312; **文献标志码** A

随着我国对低渗透油田的开发,低渗透岩石储层中特殊的渗流特征和规律引起了很多学者的关注。由于低渗透砂岩储集层的孔隙结构和表面物理性质极为复杂,其渗流机理、油水运动规律等<sup>[1]</sup>都与一般中高渗透砂岩储集层有很大不同。研究表明,低渗透油藏的渗流不符合 Darcy 定律,究其原因主要是因为启动压力梯度的存在。目前,国内很多学者对启动压力梯度做了大量的研究工作<sup>[2,3]</sup>,主要包括实验室内的单相及两相启动压力梯度的测定<sup>[4,5]</sup>,但绝大部分均是在实验条件和设备上做的改进工作。基于以上调研发现大部分学者均未利用到油田的实时生产动态和静态数据,因此,本文提出了一种可以利用生产数据的全新计算启动压力梯度的理论方法。

## 1 理论公式推导

低渗透油藏与中高渗透油藏渗流特征最大的不同之处是存在启动压力梯度,具有启动压力梯度的渗流公式如(1)。

$$V = \frac{K}{\mu} \left( \frac{dP}{dr} - \lambda \right) \quad (1)$$

式(1)中  $\lambda$  为启动压力梯度, MPa/m。对特定的油藏和流体可视为常数。

对稳定径向流式(1)可写为:

$$Q = \frac{2\pi K h r}{\mu} \left( \frac{dP}{dr} - \lambda \right) \quad (2)$$

对上式积分,可得低渗透油藏圆形地层稳定生产时径向流产量公式:

$$Q = \frac{2\pi K h}{\mu \ln(r_e/r_w)} [P_e - P_{wf} - \lambda(r_e - r_w)] \quad (3)$$

从而,压力分布公式:

$$P_e - P_{wf} = \frac{Q\mu}{2\pi K h} \ln \frac{r_e}{r_w} + \lambda(r_e - r_w) \quad (4)$$

$$P_e - P_{(r)} = \frac{Q\mu}{2\pi K h} \ln \frac{r_e}{r} + \lambda(r_e - r) \quad (5)$$

其中:  $r_w < r < r_e$ ;  $Q$ , 产油量,  $m^3/d$ ;  $P_e$ , 压力波影响半径边缘压力, 等于原始地层压力;  $P_{(r)}$ , 半径为  $r$  处的压力分布 ( $r < r_e$ ), MPa;  $h$ , 油层厚度, m;  $r_e$ , 压力波影响半径, m;  $r$ , 任意时刻压力波及半径。

根据稳态逐次替换法,在非稳定流中,可以认为任一时刻压力分布都符合稳定流的压力分布,只是压力影响半径  $r_e$  随时间逐步增大,即  $r_e$  是时间的函数,用  $R_{(t)}$  表示。

2012年7月13日收到

第一作者简介:刘杰(1980—),男,硕士研究生,研究方向:油田开发及数值模拟。E-mail:liujie9@cnooc.com.cn

据质量守恒原理,  $t$  时刻原油采出总量由两部分组成: 井筒所有范围内原油 ( $r < r_w$ ) 和从井筒到压力波影响半径  $R_{(t)}$  范围内的原油 ( $r_w < r < R_{(t)}$ )。即:

$$N_p = N_{p1} + N_{p2} \quad (6)$$

井筒部分的产油量为:

$$N_{p1} = \pi r_w^2 h [(\varphi\gamma_o)_e - (\varphi\gamma_o)_w] \quad (7)$$

式(7)中:  $\varphi$ , 孔隙度, 小数;  $\gamma_o$ , 地层原油密度。

从井筒到压力波影响半径  $R_{(t)}$  范围内采出的原油为:

$$N_{p2} = \int_{r_w}^{R(t)} 2\pi rh [(\varphi\gamma_o)_e - (\varphi\gamma_o)_w] dr \quad (8)$$

$$(\varphi\gamma_o)_e - (\varphi\gamma_o)_w = \varphi\gamma_o C_t (P_e - P_{wf}) \quad (9)$$

$$(\varphi\gamma_o)_e - \varphi\gamma_o = \varphi\gamma_o C_t (P_e - P_r) \quad (10)$$

将式(7)一式(10)代入式(6)得:

$$N_p = \int_{r_w}^{R(t)} 2\pi rh \gamma_o \varphi C_t (P_e - P_r) dr + \pi r_w^2 h \gamma_o \varphi C_t (P_e - P_{wf}) \quad (11)$$

将式(4)、式(5)代入式(11), 积分并整理得:

$$N_p = \frac{\gamma_o \varphi C_t Q \mu}{4K} (R_{(t)}^2 - r_w^2) + \frac{\pi \gamma_o h \varphi C_t}{3} \lambda (R_{(t)}^3 - r_w^3) \quad (12)$$

考虑到  $R_t \geq r_w$ ,  $Q = J_o (P - P_{wf})$ , 并化单位制, 得到:

$$\lambda = \frac{N_p k - 6.672 \gamma_o \varphi C_t J_o (P - P_{wf}) \mu R(t)^2}{603 \gamma_o \varphi k C_t R(t)^3} \quad (13)$$

式(13)即为启动压力梯度计算公式。

由于  $R_{(t)}$  的变化与采油量直接相关, 可用物质平衡法求解。根据物质平衡原理可以得到下面的方程:

$$N_p B_o = N B_{oi} \frac{S_{oi} C_o + C_p + S_{wc} C_w}{1 - S_{wc}} \Delta p \quad (14)$$

式(14)中:  $S_{oi}$ —油藏的原始含油饱和度, 小数,  $S_{oi} = 1 - S_{wc}$ 。

令  $C_{eff} = \frac{S_{oi} C_o + C_p + S_{wc} C_w}{1 - S_{wc}}$ , 定义为油藏的有效压缩系数, 则式(14)就可以写成更为简洁的式(15)。

$$N_p B_o = N B_{oi} C_{eff} \Delta p \quad (15)$$

式(15)就是封闭未饱和油藏弹性驱动的物质平衡方程。方程的左边为采出的地下体积, 方程的右边为地下体积的膨胀量, 这两个体积相等, 就反映了物质平衡的基本原理。

根据单储系数定义(用符号  $\omega_o$  表示), 计算公式为:

$$\omega_o = \frac{N}{\pi r^2 h} \quad (16)$$

式(16)中:  $N$ , 地质储量;  $h$ , 油层厚度, m。

利用式(15)和式(16), 可得到泄油半径  $r$ , 即  $R_{(t)}$  的计算公式:

$$R(t) = \sqrt{\frac{N_p B_o}{\omega_o h \pi B_{oi} C_{eff} \Delta p}} \quad (17)$$

将式(17)中的计算得到  $R_{(t)}$  和对应的  $N_p$  代入式(13)即为最终的启动压力梯度计算式。

## 2 实例分析

以某低渗油田为例, 收集到符合该理论的 8 口生产井, 具体计算参数如表 1 所示。

表 1 某低渗油田具体计算基本参数及计算结果

井号	累产/m <sup>3</sup>	孔隙度/ (m <sup>3</sup> · MPa <sup>-1</sup> )	采油指 数/	平均地 层压力/ MPa	井底 流压/ MPa	试井 渗透率 /mD	波及 半径/ m	启动压力 梯度/( MPa · m <sup>-1</sup> )
A1	3 376	0.135	1.17	32.5	28	1	74	0.060 9
A2	45 568	0.146	15.68	33	28	26	441	0.003 5
A3	1 753	0.155	2.718	43	26.5	13	120	0.006 2
A4	59 549	0.147	25.76	32.2	30	17	355	0.008 9
A5	40 886	0.152	17.64	34.6	30	39	507	0.002 0
A6	2 343	0.16	1.72	32	27.8	5	193	0.0185
A7	11 921	0.145	12.18	36	27	12	296	0.008 8
A8	12 149	0.15	4.6	32	28.3	11	186	0.0125

根据上述计算结果, 绘制渗透率与启动压力梯度的关系曲线, 如图 1 所示。

从图 1 可以看出, 启动压力梯度随着渗透率的增大而减小, 呈幂指数关系快速下降趋势。渗透率大于 10 mD 时, 随着渗透率的增大, 启动压力梯度逐渐减小而且变化平稳; 当渗透率降低到 10 mD 以后, 随着渗透率的降低, 启动压力梯度急剧上升, 此时启动压力梯度非常大。

为了验证结果的准确性, 接下来看一下新方法

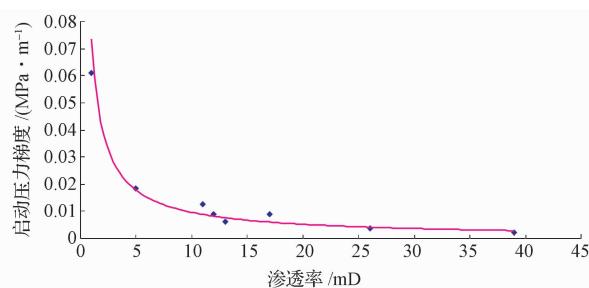


图 1 某低渗油田启动压力梯度和渗透率关系图

计算结果和实验室测量数据的对比情况：

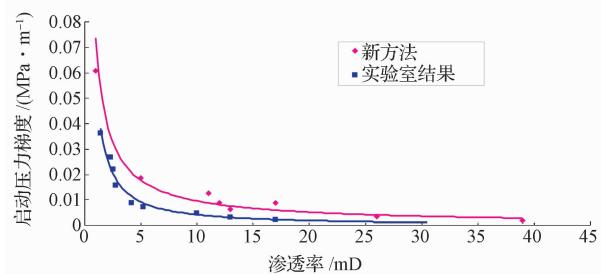


图 2 某低渗油田启动压力梯度和  
渗透率关系图

从图 2 可以看出, 新方法和实验结果趋势类似, 并且数值也较为接近, 但是新方法计算结果高于实验室测得启动压力梯度。分析认为本次实验是采用模拟地层水做驱替流体的情况下测得的, 并未模

拟两相流情况, 然而真实地层的流动一般都是两相流动, 因此, 新方法结果略大于实验结果也符合实际情况。

### 3 结论及认识

(1) 本文以渗流理论为基础, 运用稳态逐次替换法, 建立了一种全新计算启动压力梯度的理论计算公式, 该方法利用实际产量以及压力等常规生产数据, 简单可行, 为实验室求取启动压力梯度的传统方法做了很好的补充。

(2) 运用该新方法对某低渗油田启动压力梯度进行了计算, 并与实验室测得的数据进行对比, 结果表明新方法计算结果较为合理可信。

### 参 考 文 献

- 1 黄延章. 低渗透油层渗流机理. 北京: 石油工业出版社, 1999. 12
- 2 李道品. 低渗透油田高效开发决策论. 北京: 石油工业出版社, 2003: 56—65
- 3 阎庆来, 何秋轩, 阮 敏, 等. 低渗透油田开发技术. 北京: 石油工程出版社, 1994: 350—363
- 4 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. 石油勘探与开发, 2002; 29(2): 86—89
- 5 邓玉珍, 刘慧卿. 低渗透岩心中油水两相渗流启动压力梯度试验. 石油钻采工艺, 2006; 28(3): 37—40

## New Method to Confirm the Starting Pressure Gradient for Low Permeability Reservoir

LIU Jie<sup>1</sup>, ZHAO Xiu-juan<sup>1</sup>, LIAO Xin-wu<sup>1</sup>, CHAI Shi-chao<sup>1</sup>, HAO Zhen-ping<sup>2</sup>  
(Tianjin Branch of CNOOC Ltd.<sup>1</sup>, Tianjin 300452, P. R. China;  
Shenzhen Branch of CNOOC Ltd.<sup>2</sup>, Shenzhen 518000, P. R. China)

[Abstract] Based on the filtration theory, the steady successive substitution method to divide the entire flow process into differentiation elements, assuming steady flow in each differentiation element is used, then substituted the stable production rate equation which is suit for the low-permeability reservoirs into each differentiation element, after integral calculation, combining with material balance equation could obtain the start-up pressure gradient. By using production data including production and pressure, this method break away from the traditional laboratory method to calculate the starting pressure gradient. At the same time this new method is applied to an oil field and compared with the measured starting pressure in laboratory, the results confirm the reasonableness of the new method.

[Key words] steady successive substitution    low-permeability reservoir    starting pressure gradient    theoretical formula