

低渗透油藏面积井网产能计算方法

刘海龙^{1,2}, 吴淑红^{1,2}

(1. 中国石油勘探开发研究院 油气田开发软件中心, 北京 100083; 2. 提高石油采收率国家重点实验室, 北京 100083)

摘要: 针对低渗透油藏储层流体难以动用和采收率低的难题, 基于低渗透油藏非达西渗流理论, 考虑启动压力梯度, 从两参数模型出发, 利用流线积分方法, 建立了面积井网产量计算数值积分模型, 引入有效启动系数, 给出了反九点井网有效启动系数与井距的关系图版, 同时分析了井网井距、注采压差对产量、有效启动系数的影响。研究表明: 井网井距越大, 产量越低, 启动系数越低。在经济和技术指标所允许的范围内, 采用小井距开发低渗透油藏, 可提供低渗透油藏采收率。

关键词: 低渗透油藏; 启动压力梯度; 有效启动系数; 井距; 注采压差

DOI: 10.15938/j.jhust.2016.01.019

中图分类号: O175 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2683(2016)01-0093-07

A New Method to Calculate Well Pattern Productivity in Low Permeable Reservoir

LIU Hai-long^{1,2}, WU Shu-hong^{1,2}

(1. Oil and Gas Field Development Software Center, Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Beijing 100083, China;

2. State Key Laboratory of Enhanced Oil Recovery, Beijing 100083, China)

Abstract: In low permeability reservoirs, it is difficult for the reservoir fluid to flow, and the recovery factor is very low. Based on the non-Darcy flow in low permeability reservoir, taking threshold pressure gradient into consideration, in this paper, we build a new method to calculate the well pattern. This method is based on the two-parameter continuous model, and the method of flow line integrals and the numerical integration were used to build the productivity model. By introducing the effective threshold coefficient, the relationship between the effective threshold coefficient and the well spacing was established. What's more, the effect of the well spacing and the water injection differential pressure on the productivity and effective threshold coefficient were analyzed. The studies show that: the larger the well spacing is, the lower the yield production is, and the lower the effective threshold coefficient is. Reducing well spacing is good for the low permeability reservoir development and can improve the recovery factor.

Keywords: low permeability reservoir; threshold pressure gradient; effective threshold coefficient; well spacing; water injection differential pressure

收稿日期: 2015-03-06

基金项目: 中国石油集团重大科技专项(z121100004912001)。

作者简介: 刘海龙(1989—), 男, 工程师, 硕士研究生, E-mail: 478277608@qq.com;

吴淑红(1971—), 女, 博士, 高级工程师。

0 引言

目前,国内几大石油公司面临低渗透油藏开发的难题,然而低渗透油藏由于具有低孔、低渗的特点,开发方式与中高渗透油藏具有一定的差异.大量研究表明^[1-4]:除高速非达西气体渗流以外,低渗透油藏储层流体不遵循达西定律,而是表现为低速非达西渗流^[5-9].以往的经典油藏工程方法在应用和指导低渗透油藏开发时,存在一定的局限性.因此需要建立基于非达西渗流的低渗透油藏工程计算模型.

目前,低渗透油藏主要以面积井网进行开发.针对于面积井网产能计算,前人做过很多研究.罗万静等利用压力叠加原理,采用镜像反演方法,给出了封闭边界的低渗透油藏拟稳态渗流产能与注采压差模型^[10];杜殿发等,结合低渗透油藏渗流特征,采用等值渗流阻力方法,给出了面积井网产能表达式^[11];徐庆岩等基于特低渗透油藏面积井网产能公式,利用叠加原理和当量井径模型,给出了水平井、直井联合面积井网产能表达式^[12];何英等采用流管方法,建立了低渗透矩形油藏压裂直井产能模型^[13];赵春森等利用水电相似原理,推导了不同类型面积井网产能模型^[14].总结前人的研究,主要体现在三个方面:启动压力梯度模型;产能劈分模型;拟启动压力梯度模型.本文基于前人的研究成果,

采用流线积分法^[15-18],基于非达西渗流和两参数模型,推导了一套考虑启动压力梯度的面积井网产能模型,使得产量计算和井网优化更接近实际生产,并在此基础上分析了注采压差、井网井距对产量的影响,引入启动系数,评价了低渗透油藏储层动用程度.

1 注采单元

图1中a为五点井网,b为一个井组的1/8流动单元,c为该流动单元的简化模型图,对于不同的井网类型,均可得到如图1c的注采单元模型图.假定:①油井见水前,渗透率为常数;②注采单元中,启动压力梯度为常数;③地层流体流动发生单相不稳定渗流,流体黏度为常数;④忽略重力、毛管力的影响;⑤注采单元中,无气体的溶解和逸出.

假定井距为 d ,井半径为 r_w ,任取一流管微元ADBF,该微元的流管中线 x 由AE、EB构成,分别记为 x_1, x_2 ,微元角度增量 $\angle DAF, \angle DBF$ 分别为 $\Delta\alpha, \Delta\beta$,注入井的夹角为 $\angle DAB$ 为 α ,计算单元夹角 $\angle CAB$ 为 α_m ;生产井的夹角 $\angle DBA$ 为 β ,计算单元夹角 $\angle CBA$ 为 β_m ;不同的井网类型对应不同的注采单元,不同的注采单元下,注采井的距离和井距的比值不同,将该比值定义为长度系数 ω ,为无量纲.记距离注入井的流线长度为 ξ 处的流管截面积为 $A(\xi)$,则有注入井、生产井对应的流管截面积分别为 $A_1(\xi), A_2(\xi)$.

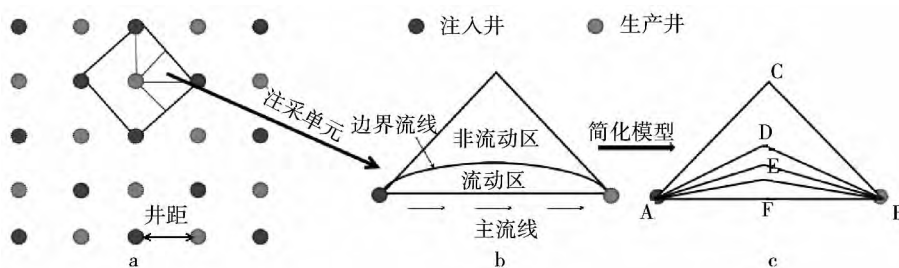


图1 一注一采单元示意图

易得:

$$\frac{\alpha}{\beta} = \frac{\Delta\alpha}{\Delta\beta} = \frac{\alpha_m}{\beta_m} = n \quad (1)$$

$$x_i = \frac{\omega d}{\sin(\alpha + \beta)} \sin \left[\frac{\alpha + \beta}{2} - (-1)^i \frac{\alpha - \beta}{2} \right], i = 1, 2 \quad (2)$$

$$A_i(\xi) = 2h\xi_i \tan \left[\frac{\Delta\alpha + \Delta\beta}{4} - (-1)^i \frac{\Delta\alpha - \Delta\beta}{4} \right], \quad (3)$$

$$r_w \leq \xi_i \leq x_i, i = 1, 2$$

2 注采单元产量模型

目前非线性渗流的数学模型描述方法很多^[19-21],如表1所示.表1中的渗流模型主要分为拟启动压力梯度模型、分段模型和连续模型.目前研究非线性渗流主要以唯象法为主,原因在于:经典达西定律不能描述低渗透油藏的渗流特征,低渗透油藏存在启动压力、边界层以及微尺度流动效应,且

启动压力并非常数的特性,增大了精确描述低渗透 储层流体真实渗流规律运动方程的难度.

表 1 非线性渗流数学模型

模型	方程	模型说明
拟启动压力模型	$v = \begin{cases} \frac{k}{\mu}(\nabla p - G) & \nabla p \geq G \\ 0 & \nabla p < G \end{cases}$	低于 G 不能计算
幂指数形式	$v^n = \frac{k}{\mu} \nabla p, n \geq 1$	线性段模拟误差大
全程描述	$v = \frac{k}{\mu} \nabla p^{1+nd}, n_d = 1 + \frac{2}{1 + \frac{\Delta p}{L/G}}$	线性区与非线性区连接位置难解出
三参数连续模型	$v(a_1 + \frac{a_2}{1+bv}) = -\nabla p$	无法反映实际渗流存在启动压力现象
两参数连续模型	$v = -\frac{k}{\mu} \nabla p (1 - \frac{1}{a+b \nabla p })$	能够很好的反映地下流体渗流情况

本文选取两参数连续模型,不考虑压力敏感效应的低渗透油藏非线性渗流的两参数模型表达式为:

$$v = -C \frac{k}{\mu} \frac{dp}{dx} \left(1 - \frac{1}{a+b \left| \frac{dp}{dx} \right|} \right) \quad (1)$$

式中: v 为渗流速度, cm/s ; k 为油藏有效渗透率, mD ; μ 为地层条件下原油黏度, cP ; p 为流体压力, Pa ; x 为渗流介质长度, cm ; a, b 为模型的参数,取值与具体的实际油藏有关; C 为单位换算系数,当所取单位为达西制单位时, C 为 1,当所取单位为 SI 制单位时, C 为 86.4,本文取达西制单位进行研究.

负号是考虑到速度方向与压力增长方向相反而加入的. 当速度方向与压力增加方向一样时, $\left| \frac{dp}{dx} \right| = \frac{dp}{dx}$, 对应于生产井(汇相); 相反, $\left| \frac{dp}{dx} \right| = -\frac{dp}{dx}$, 对应于注入井(源相). 本文仅研究汇相情况.

在 $\Delta\alpha$ 处流管截面流量为:

$$\Delta q = \frac{k}{\mu} \sum_{i=1}^2 A(\xi_i) \nabla p \left(1 - \frac{1}{a+b \nabla p} \right) \quad (5)$$

联立式(4)、(5),沿流线方向的压力分布为:

$$\frac{dp}{d\xi} = \frac{1-a}{2b} + \frac{M}{2} + \frac{\sqrt{(a+1+Mb)^2 - 4a}}{2b} \quad (6)$$

式中:

$$M = \frac{\Delta q}{\sum_{i=1}^2 A(\xi_i)} \frac{\mu}{k}$$

式(1)、(3)代入式(6),并积分,整理:

$$p - p_w - \frac{1-a}{2b} (x_1 + x_2 - r_w) =$$

$$\begin{aligned} & \frac{\Delta q}{\Delta a} \frac{\mu}{2kh} \ln \frac{x_1}{r_w} + \frac{\Delta q}{\Delta a} \frac{\mu}{2nkh} \ln \frac{x_2}{r_w} + \\ & \int_{r_w}^{x_1} \frac{\sqrt{(a+1 + \frac{\Delta q}{\Delta a} \frac{\mu b}{kh\xi_1})^2 - 4a}}{2b} d\xi_1 + \\ & \int_{r_w}^{x_2} \frac{\sqrt{(a+1 + \frac{\Delta q}{\Delta a} \frac{\mu b}{nkh\xi_2})^2 - 4a}}{2b} d\xi_2 \end{aligned} \quad (7)$$

式中: p_w 为井底压力, MPa .

对式(7) 在 $(0, \alpha)$ 积分, 并记, $\int_0^\alpha \frac{\Delta q}{\Delta \alpha} d\alpha = q$, 可得:

$$\begin{aligned} & \alpha \left[p - p_w - \frac{1-a}{2b} (x_1 + x_2 - r_w) \right] = \\ & q \left(\frac{\mu}{2kh} \ln \frac{x_1}{r_w} + \frac{\mu}{2nkh} \ln \frac{x_2}{r_w} \right) + \\ & \int_{r_w}^{x_1} \frac{\sqrt{(a+1 + q \frac{\mu b}{kh\xi_1})^2 - 4a}}{2b} d\xi_1 + \\ & \int_{r_w}^{x_2} \frac{\sqrt{(a+1 + q \frac{\mu b}{nkh\xi_2})^2 - 4a}}{2b} d\xi_2 \end{aligned} \quad (8)$$

式(8) 一个关于 q 的超越方程 $f(q) = 0$, 对该方程进行数值求解, 直接求解该方程比较复杂^[22-23], 此处用近似的牛顿迭代求解. 构造以下迭代:

$$q_{n+1} = q_n - \frac{2f(q_n) \Delta q}{f(q_n + \Delta q) - f(q_n - \Delta q)} \quad (9)$$

并取初值:

$$q_0 = \frac{q_d}{2}$$

式中: q_d 为相同条件下,应用达西定律计算的产量值, m^3/d .

逐次计算 $q_1, q_2, \cdots, q_n$ 且当 $|q_n - q_{n-1}| < \varepsilon$ 时 (ε 为满足要求的产量误差允许范围), 此时计算所得的 q 即为基础井网的产量, 各井网类型的角度取值情况^[17], 如表 2 所示.

表 2 各井网类型参数取值

井型	α_m	β_m	n	ω
五点井网	$\pi/4$	$\pi/4$	1	1
反七点井网	$\arctan 0.5$	$\pi/2$	$2\arctan 0.5/\pi$	1
反九点井网边井	$\pi/6$	$\pi/3$	0.5	1
反九点井网角井	$\pi/4 - \arctan 0.5$	$\pi/4$	$4(\pi/4 - \arctan 0.5)/\pi$	$\sqrt{2}$

3 模型验证

3.1 理论验证

式(4)中,当 b 趋于无穷大时即变为达西渗流. 取注采压差为 15 MPa, 渗透率为 3 mD, 油层厚度为 5 m, 黏度为 5 mP·s, 井筒半径为 0.1 m. 计算推导的五点井网、反七点井网的单井产量(本文解), 并与 Muskat 计算解^[24]进行对比(表 3), 相对误差控制在 0.5% 以内, 说明推导的单井产量模型是可行的、准确的.

表 3 积分数值解与精确解计算结果对比

井距/m	五点井网单井产量			反七点井网单井产量		
	计算解/ (m^3/d)	本文解/ (m^3/d)	误差/ %	计算解/ (m^3/d)	本文解/ (m^3/d)	误差/ %
200	1.749 2	1.741 1	0.468 0	1.158 3	1.154 1	0.363 4
225	1.720 2	1.712 3	0.463 1	1.139 2	1.134 3	0.432 5
250	1.695 1	1.687 1	0.472 7	1.122 7	1.118 6	0.368 1
275	1.672 9	1.665 2	0.465 2	1.108 1	1.102 8	0.480 5
300	1.653 2	1.645 5	0.467 4	1.095 2	1.090 4	0.439 2
325	1.635 5	1.628 3	0.443 7	1.083 5	1.079 4	0.378 3
350	1.619 4	1.612 4	0.437 5	1.072 9	1.068 6	0.402 8
375	1.604 8	1.597 8	0.433 4	1.063 3	1.058 6	0.442 9
400	1.591 3	1.584 9	0.399 7	1.054 4	1.049 9	0.429 2

3.2 油藏工程论证

利用文 17 的参数做实例计算(表 4), 相对误差均控制在 8% 以内, 油藏实例计算表明数值积分准确、可靠.

表 4 实例计算表

井号	井位置	$q_{\text{计算}}/(\text{m}^3/\text{d})$	$q_{\text{文献}}/(\text{m}^3/\text{d})$	误差/%
B1	边井	3.29	3.42	3.80
B2	边井	3.39	3.68	7.88
B3	边井	2.85	2.93	2.73
B4	边井	2.71	2.59	4.63
B5	角井	3.59	3.86	6.99
B6	角井	6.97	7.26	3.99
B7	角井	4.38	4.51	2.88
B8	角井	5.61	5.29	6.05

4 参数分析

4.1 启动压力梯度

设定启动压力梯度为 0.05 MPa/m, 与 Muskat 计算解^[24]进行对比(图 2). 由图 2 知: 考虑启动压力梯度时, 井网单井产量降低, 并且随着井距的增大, 产量从近似线性变化过渡到非线性变化. 而不考虑启动压力梯度的精确解, 产量随井距的增大变化不太明显, 说明在低渗透油藏中, 需要部分能量克服地层阻力. 对于同一井距而言, 五点井网受启动压力梯度影响的程度比反七点井网小, 并且随着井距的增大, 这种影响逐渐降低. 当井距为 400m 时, 油井基本无产量, 符合低渗透油藏实际开发. 流线的数量多少, 亦能解释考虑启动压力梯度产量降低的原因(图 3). 图 3 显示考虑启动压力梯度后, 流线的数量明显减少, 导致注入井波及体积变小, 同样注采比下波及系数变小, 被驱替的原油减少, 流到井

筒附近的流量就减小。

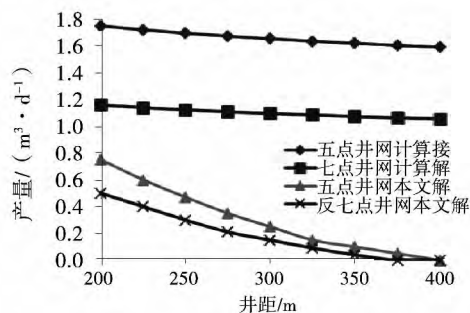
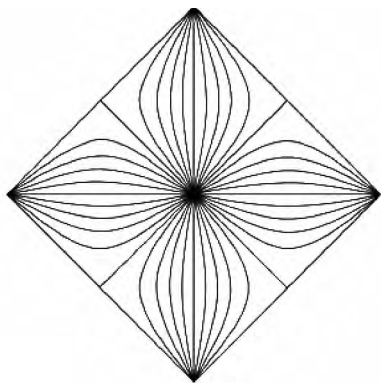
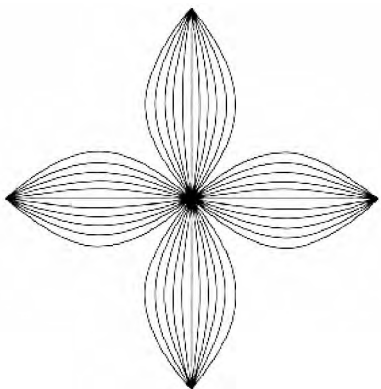


图 2 不同启动压力梯度下产量与井距关系图



(a) 启动压力梯度为 0.00 MPa/m



(b) 启动压力梯度为 0.05 MPa/m

图 3 不同启动压力梯度下五点井网流线图

4.2 井距的影响

设定注采压差为 15 MPa, 利用积分数值解求得不同井网类型下的单井产量与井距关系变化图(图 4)。由图 4 知: 五点井网和反七点井网的单井产量随井距刚开始是线性变化, 当井距增大一定值时, 产量递减率变小。反九点井网中, 角井和边井的相互影响导致井距与产量并非线性关系, 且前后产量变化率不同。三种井网类型中, 五点井网整体上产量下降最快, 其次是反七点井网。反九点井网产量下降相对缓慢, 但是由于劈分产量使得单井产量低, 所

以在油藏开发中, 在相同注采比条件下, 反七点井网是常用的井网类型, 理论上论证了反七点井网实用性的正确性。当井距增大到 300 m 时, 各井网类型的单井产量基本趋于 0, 说明在油田实际开发中, 存在极限井距。对井距进行优化时, 必须考虑。

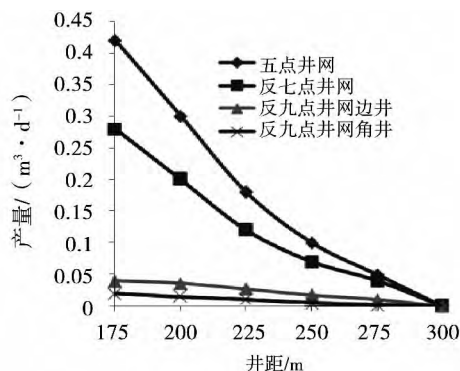


图 4 不同井网类型单井产量与井距的关系图

对于同一井距, 不同井网类型的产能是不一样的, 五点井网最大, 其次是反七点井网。原因是因为注水井的波及体积不一样。五点井网中, 流线是从四个方向向生产井流动(图 3), 而反七点井网则是从流向两口生产井(图 5)。流线越少, 注水井波及系数就小, 单位厚度被驱替的原油面积就小, 进而流入井筒的原油就少, 相应地面产量就小。

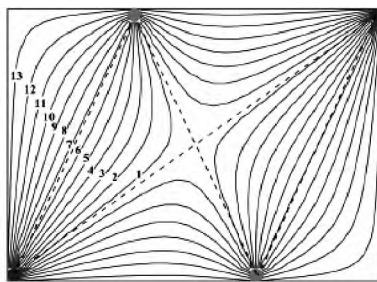


图 5 反七点井网流线图

4.3 注采压差

研究注采压差对产量的影响时, 先固定井距, 一般低渗透油藏开发的井距为 250 m, 为此设定井距为 250 m, 渗透率为 3 mD, 利用积分数值解求得不同井网类型下的单井产量与注采压差的关系变化如图 6。

由图 6 可知, 注采压差必须达到一定值时, 油藏原油才能动用, 即储层下的流体流动必须具有一定的压差, 符合经典达西渗流理论。在该参数条件下, 最小注采压差为 13 MPa。各井网类型产量与注采压差开始增加幅度不大, 但是当压差足够大时, 便出现线性增大。三种井网类型, 受注采压差的影响程度

不一样,五点井网增加最快,其次是反七点井网、反九点井网。

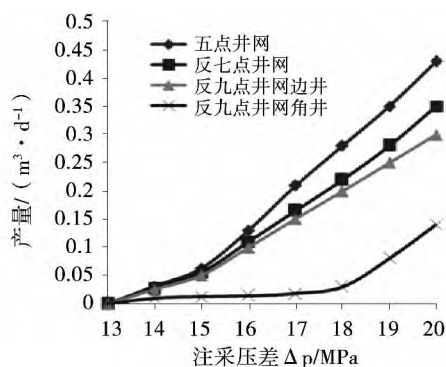


图6 不同井网类型单井产量与注采压差的关系图

4.4 有效启动系数

由于低渗透油藏发生非达西渗流,当注采压差和井距一定时,地下储层内的流体并不一定都能有效动用,将动用的流体与注采单元中的流体的比值定义为有效启动系数。对应于式(6),作积分上下限变化,最后得到:

$$p - p_w - \frac{1-a}{2b} \left[\frac{\omega d (\sin \alpha_0 + \sin \beta_0)}{\sin(\alpha_0 + \beta_0)} - 2r_w \right] \quad (10)$$

式中: α_0 、 β_0 为动用流体对应的夹角。

通过求解式(8),可得出启动角 α_0 ,结合图1,可得,有效启动系数简便计算模型:

$$\text{有效启动系数} = \frac{S_{\Delta ADB}}{S_{\Delta ACB}} \quad (11)$$

式中: $S_{\Delta ADB}$ 、 $S_{\Delta ACB}$ 为三角形 ADB、ACB 的面积。

计算得出的有效启动系数、启动角,可以用来分析井网井距对低渗透油藏储层流体动用程度的影响大小,进而指导油藏开发设计。取注采压差为 15 MPa,可以计算出不同井网类型在该压差下启动系数与井距关系(图7)。

由图7可得:整体上启动系数与井距为负相关关系,影响程度是反七点井网法最小,其次是五点井网。由于反九点井网中,角井和边井的相互影响,使得其变化不同于五点井网和反七点井网。在一定的井距范围内(250~300),启动系数与井距呈近似线性关系。

将文[17]中的渗透率分为6个层次,即 0.50 mD、1.00 mD、3.00 mD、5.00 mD、10.0 mD、20.0 mD。图5表明反七点井网启动系数受井距影响较小,为进一步优化井距,作不同渗透率下的有效启动系数和井距关系图版(图8),不同注采压差下的有

效启动系数和井距关系图版(图9)。图8表明,随着渗透率的增大,井距的影响程度逐渐降低。原因是渗透率越大,流体的流动能力越好,为克服阻力而减小的弹性能量就少。

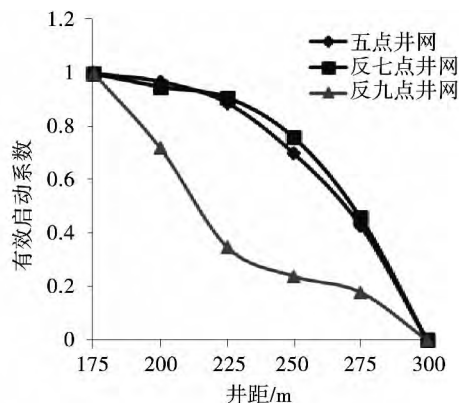


图7 不同井网类型有效启动系数与井距关系

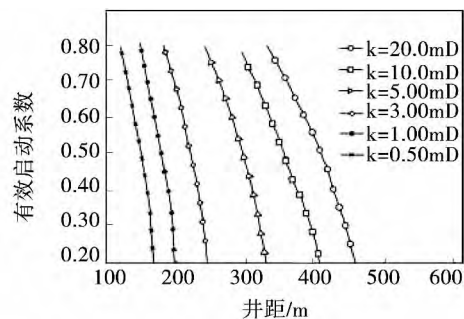


图8 不同渗透率下有效启动系数和井距关系图版

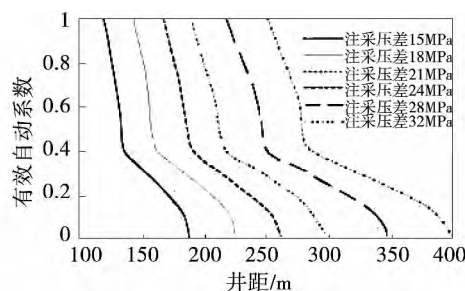


图9 不同注采压差井网启动系数与井距关系图版

对于文[7]的井区,采用式(10)计算得启动系数为 0.51,动用程度严重偏低,因此必须对该井区的井距进行优化。由于是采用反九点井网,因此首先做出不同压差下有效启动系数与井距的关系图版,如图9所示。由图9可知,该井区的合理井距为 213 m。因此必须对现有井网进行加密。通过进行井网加密,不仅可以有效解决低渗透储层连通问题,还可以建立有效驱动体系,最终使得该井区的有效启动系数接近 1。

5 结 论

1) 基于低渗透油藏非达西渗流, 考虑启动压力梯度, 从两参数模型出发, 建立了五点井网、反七点井网、反九点井网的产量计算数值积分模型。

2) 引入了启动系数, 可定量描述在不同压差下, 低渗透油藏采用不同井网开发时, 储层动用程度。同时建立了反九点井网启动系数与井距的关系图版。

3) 为提高低渗透油藏储层的动用程度, 可以通过提高注采压差、减小注采井距。

参 考 文 献:

- [1] 邓英尔, 刘慈群. 低渗油藏非线性渗流规律数学模型及其应用 [J]. 石油学报, 2001, 22(4): 72-76.
- [2] 朱维耀, 刘今子, 宋洪庆, 等. 低/特低渗透油藏非达西渗流有效动用计算方法 [J]. 石油学报, 2010, 31(3): 452-457.
- [3] 杨仁锋, 姜瑞忠, 刘世华. 低渗透油藏考虑非线性渗流的必要性论证 [J]. 断块油气田, 2011, 18(4): 493-497.
- [4] 孙建芳. 胜利油区稠油非达西渗流启动压力梯度研究 [J]. 油气地质与采收率, 2010, 17(6): 74-77.
- [5] 李松泉, 程林松, 李秀生等. 特低渗透油藏非线性渗流模型 [J]. 石油勘探与开发, 2008, 35(5): 606-612.
- [6] 张代燕, 王子强, 等. 低渗透油藏最小启动压力梯度实验研究 [J]. 新疆石油地质, 2011, 29(1): 106-109.
- [7] 傅春华, 葛家理. 低渗油藏的非线性渗流理论探讨 [J]. 新疆石油地质, 2002, 23(4): 317-320.
- [8] 朱圣举. 低渗透油藏的压力波传播规律 [J]. 新疆石油地质, 2007, 28(1): 85-87.
- [9] 杨清立, 杨正明, 王飞, 等. 特低渗透油藏渗流理论研究 [J]. 钻采工艺, 2007, 30(6): 52-54.
- [10] 罗万静, 王晓东, 陈建阳, 等. 五点井网产能快速评价新方法 [J]. 石油勘探与开发, 2010, 37(6): 726-731.
- [11] 杜殿发, 侯加根, 李冬冬, 等. 低渗透油藏直井水平井联合井网产能公式 [J]. 油气地质与采收率, 2012, 19(2): 64-68.
- [12] 徐庆岩, 于靖之, 蒋文文, 等. 特低渗透油藏压裂水平井与直井联合开采井网产能预测新方法 [J]. 科学技术与工程, 2014, 14(18): 30-34.
- [13] 何英, 杨正明, 熊生春. 低渗透油藏矩形井网产能计算研究 [J]. 钻采工艺, 2009, 32(1): 46-49.
- [14] 赵春森, 李佩敬, 郭志强, 等. 低渗透各向异性油藏交错井网产能计算方法研究 [J]. 特种油气藏, 2008, 15(6): 67-72.
- [15] MUNSEOK Baek. A Hybrid Stream Tube Simulator Using a Semi Analytical Method [D]. Stanford Doctor Degree Dissertation, 1989.
- [16] HIGGINS R. V., LEIGHOTN A. J. Performance of Five Spot Water Flood in Stratified Reservoirs Using Stream Lines [C] // SPE 57, 1961.
- [17] 计秉玉, 李莉, 王春艳. 低渗透油藏非达西渗流面积井网产油量计算方法 [J]. 石油学报, 2008, 29(2): 255-230.
- [18] 何英, 杨正明, 刘学伟, 等. 低渗透油田考虑启动压力梯度计算井网产量 [J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2009, 31(3): 163-167.
- [19] 史瑞娜, 王晓冬等. 低渗透地层压力扰动传播规律 [J]. 特种油气藏, 2011, 18(4): 80-82.
- [20] ZENG Baoquan, CHENG Linsong, Chunlan Li. Low Velocity Non-linear Flow in Low Permeability Reservoir [J]. Petrol. Sci. Eng. 2011, 80(1): 1-6.
- [21] XU J. et al. Transient Pressure Behavior for Dual Porosity Low Peameability Reservoir Based on Modified Darcy's Equation [C] // SPE153480, 2012.
- [22] 姚慧丽, 卜宪江, 宋晓秋. 一类微分方程的指数增长的温和渐近概自守解 [J]. 哈尔滨理工大学学报, 2014, 19(5): 23-25.
- [23] 姚慧丽, 王健伟. 一类随机积分-微分方程的均方渐近概周期解 [J]. 哈尔滨理工大学学报, 2014, 19(6): 118-222.
- [24] MUSKAT M. The Flow of Homogeneous Fluids Through Media [M]. New York, USA: McGraw-Hill, 1937.

(编辑: 关 毅)