

致密变形介质油藏五点面积井网水驱动态分析

曹耐¹, 董平川^{1*}, 雷刚²

1 中国石油大学(北京)石油工程学院, 北京 102249

2 College Petroleum of Engineering & Geoscience, King Fahd University of Petroleum and Minerals, Dhahran 31261, Kingdom of Saudi Arabia

* 通信作者, dpcfem@163.com

收稿日期: 2018-09-08

国家科技重大专项(编号 2016ZX05037-003, 2017ZX05049-003) 基金资助

摘要 致密变形介质油藏水驱渗流过程中会产生部分或全部不可逆形变, 地层渗透率、孔隙度会发生不同程度降低, 水驱渗流阻力大, 难以形成有效的驱动压力系统, 原油难以得到很好的动用, 采收率低。以水驱油渗流模型入手, 以介质变形理论为依托, 利用叠加原理推导了考虑介质变形五点面积井网势函数、压力函数、流函数和平面速度函数解析公式, 根据流函数得到井网流线。结合物质平衡理论, 通过对平面速度函数积分得到无因次井网单元见水时间。基于不变流线假设, 通过特征线方法求解水驱油渗流方程组得到平面等饱和度线运动方程。研究表明, 介质变形系数对储层有效动用程度有重大影响, 介质变形造成面积井网动用程度降低, 介质变形系数越大, 储层有效动用程度越低, 采出程度越低。

关键词 致密油藏; 变形介质; 有效动用系数; 介质变形系数; 五点面积井网

Analysis of water flooding behavior in a five-spot well pattern in tight deformed reservoirs

CAO Nai¹, DONG Pingchuan¹, LEI Gang²

1 College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

2 King Fahd University of Petroleum and Minerals, Dhahran 31261, Kingdom of Saudi Arabia

Abstract A partial or complete irreversible deformation is generated in the development process of tight deformed reservoirs. Formation permeability and porosity will decrease with various degrees, the resistance to water flooding is large, and it is difficult to form an effective driving pressure system to exploit and develop the crude oil. As the result, the degree of the effective development is low. This paper takes full account of the characteristics of non-linear oil-water two-phase seepage in a low permeability reservoir. Deformed porous media, potential function, pressure function, stream function and velocity function analytical formulations are presented by considering of the influence of stress sensitivity through the superposition principle. According to the material balance theory, the breakthrough time of the dimensionless well pattern unit is derived through the integral of the velocity function. Moreover, according to the constant streamline hypothesis, a motion equation of the isosaturation surface is derived with a characteristic line method. The results show that by this new method, the stress sensitive coefficient has a significant impact on the effective development coefficient. The larger the media deformation factor is, the lower are the effective development coefficient and the oil recovery.

引用格式: 曹耐, 董平川, 雷刚. 致密变形介质油藏五点面积井网水驱动态分析. 石油科学通报, 2019, 02: 165-173

CAO Nai, DONG Pingchuan, LEI Gang. Analysis of water flooding behavior in a five-spot well pattern in tight deformed reservoirs. Petroleum Science Bulletin, 2019, 02: 165-173. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2019.02.015

Keywords tight; deformed medium; effective development coefficient; media deformation factor; five-spot well pattern

doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2019.02.015

0 引言

致密变形介质油藏的渗流特征与常规油藏的渗流特征显著不同^[1-2],有着其特有的渗流规律,主要表现为2个方面:①孔喉细小、孔喉比大、毛管压力的影响显著,非均质性强,致使流体渗流偏离Darcy定律,出现非线性-拟线性的非Darcy渗流规律^[3-4];②实际生产中,储层骨架产生部分或全部的不可逆变形,岩石渗透率和孔隙度降低^[5-6],对油田的动态特征有明显的影响^[7]。而且在实际开发过程中也发现了很多问题:难以形成有效的驱动压力系统,地层压力下降快,产量迅速递减,原油有效动用率低^[8-10]。

国内外学者对介质变形理论做了大量研究: Samaniego等考虑岩石应力敏感和流体性质,对储层流体非稳态渗流特征进行了分析^[11]。熊建和李凌峰对岩心驱替实验结果进行统计学分析,发现低渗透气藏岩心绝对渗透率随有效应力增加指数下降,并基于此得到了变形介质低渗透气藏产量预测公式^[12]。Samimi和Ghorbani等采用无单元数值模拟方法对变形多孔介质中多相流体流动规律进行分析^[13-14]。王美楠等结合二次梯度项及动边界理论,对低渗透变形介质油藏渗流规律进行了探讨和分析^[15]。郭平和张楠等建立了启动压力梯度和应力敏感效应共同影响下的单井产能模型,并分析了非达西渗流效应对低渗透储层单井产能的影响^[16-17]。雷刚等基于致密砂岩气藏中气体非达西渗流特征,考虑储层绝对渗透率应力敏感效应影响,推导了致密砂岩在拟稳态流动阶段的垂直裂缝井产能方程^[18]。Pesavento等对变形介质中多相流动研究进行了总结和分析^[19]。

然而,上述研究工作基本上都以岩心实验、介质变形系数对单井产能和渗流规律影响为研究目标;针对致密油藏面积井网,考虑介质变形影响的研究却不多^[20-22]。齐亚东等建立了特低渗透断块油藏不规则三角形井网有效动用系数计算模型,并以某特低渗透断块油藏为例,对不规则三角形井网有效动用系数进行了计算分析^[23]。吕栋梁等建立了低渗透油田反九点井网面积波及效率数学模型^[24]。郭粉转等考虑启动压力梯度影响,建立数学模型对低渗透油田四点井网和五点井网面积波及效率进行了计算和分析^[25-26]。上述研

究工作对于分析低渗透油藏面积井网流动规律具有重大意义,但由于上述文献并未考虑储层的介质变形,建立的理论模型不适于变形介质油藏面积井网生产动态分析,需增加对变形介质油藏面积井网的研究及讨论。因此,从渗流理论上揭示变形介质油藏井网的流动特征是提高油藏原油有效动用率亟待解决的首要问题之一。

笔者充分考虑致密油藏油水两相渗流的非线性特征及多孔介质变形特征,推导了考虑介质变形面积井网的地层压力、势函数、流函数和平面速度计算表达式,根据物质平衡理论及特征线方法,得到考虑介质变形系数面积井网单元流场分布、油藏波及系数、见水时间和剩余油饱和度分布等生产指标,并研究了不同介质变形系数对油藏生产影响。

1 致密介质变形模型驱替理论

建立考虑介质变形油水两相渗流数学模型的假设条件为:①水平均质等厚的无限大地层布有无限延伸的五点井网;②地层只有油水两相,流体在多孔介质中流动均为二维流动;③不考虑毛管压力影响;④油井以定液量生产,注入井注入量与油井产液量相等;⑤多孔介质发生变形,储层渗透率随压力发生变化,而孔隙度随压力变化较小不予考虑。

根据基本假设条件,可以得到多孔介质中油水两相流体控制方程为:

$$\begin{cases} \nabla \cdot \vec{v}_w + q_w + \frac{\partial(\phi S_w)}{\partial t} = 0 \\ \nabla \cdot \vec{v}_o + q_o + \frac{\partial(\phi S_o)}{\partial t} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

油水两相速度方程分别为:

$$\vec{v}_w = -\frac{k(p)k_{rw}}{\mu_w} \nabla p \quad (2)$$

$$\vec{v}_o = -\frac{k(p)k_{ro}}{\mu_o} \nabla p \quad (3)$$

式中 $k(p)$ 为岩石绝对渗透率。研究结果表明 $k(p)$ 为岩石孔隙结构、弹性模量和泊松比等参数的函数。目前,国内外学者主要采用指数函数来表征岩石绝对渗透率随有效应力的变化规律^[27-28],关系表达式为:

$$k(p) = k_0 \exp[\alpha(p - p_0)] \quad (4)$$

将方程(1~4)联立并整理($q_w + q_0 = 0$), 可以得到:

$$\nabla \cdot \left(\frac{\lambda_t}{\alpha} \nabla U \right) = 0 \quad (5)$$

基于不变流线假设, 计算地层压力场时, 不考虑流量在空间上变化, 方程(5)可以变形为:

$$\nabla \cdot (\nabla U) = 0 \quad (6)$$

其中

$$U = \exp[\alpha(p - p_0)]$$

$$\lambda_t = k_0 \left(\frac{k_{rw}}{\mu_{rw}} + \frac{k_{ro}}{\mu_{ro}} \right)$$

2 模型计算

2.1 压力计算

方程(6)为调和方程, 采用叠加原理, 计算无限大地层矩形5点井网稳态压力分布。如图1所示, 根据所建立直角坐标系可以得到, 油井坐标为 $(2nd+md, ma)$, 注入井坐标 $(2nd+md+d, ma)$, 其中 $(m=0, \pm 1, \pm 2, \dots; n=0, \pm 1, \pm 2, \dots)$ 。对于地层中任意点 $M(x, y)$, 第 m 排井排中第 n 口油井在 M 点的拟势函数为:

$$\psi_{mnM} = \frac{Q\alpha}{2\pi h} \ln r_{mnM} + C_{mn} \quad (7)$$

其中

$$r_{mnM} = \sqrt{(2nd + md - x)^2 + (ma - y)^2}$$

第 m 排井排中第 n 口注入井在 M 点的拟势函数为:

$$\psi'_{mnM} = \frac{-Q\alpha}{2\pi h} \ln r'_{mnM} + C'_{mn} \quad (8)$$

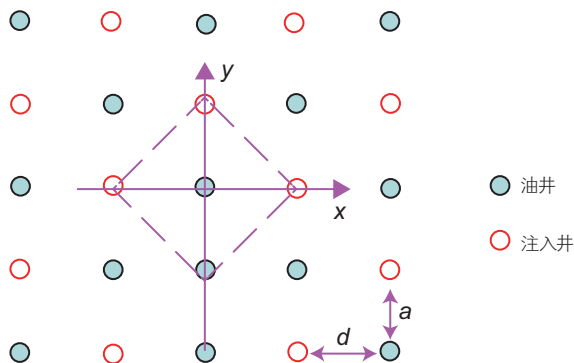


图1 矩形五点面积井网示意图

Fig. 1 The sketch map of rectangular five-spot well pattern

其中

$$r_{mnM} = \sqrt{(2nd + md + d - x)^2 + (ma - y)^2}$$

根据势叠加原理, 无穷井网在 M 点拟势函数为:

$$\psi_M = \frac{Q\alpha}{2\pi h} \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \ln \frac{r_{mnM}}{r'_{mnM}} + C \quad (9)$$

其中

$$C = \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} (C_{mn} + C'_{mn})$$

对式(9)进行处理, 可以得到:

$$\begin{aligned} \psi_M - C &= \frac{Q\alpha}{4\pi h} \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \ln \frac{(2nd + md - x)^2 + (ma - y)^2}{(2nd + md + d - x)^2 + (ma - y)^2} \\ &= \frac{Q\alpha}{4\pi h} \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \ln \frac{\cosh \frac{\pi(y - ma)}{d} - \cos \frac{\pi(x - md)}{d}}{\cosh \frac{\pi(y - ma)}{d} - \cos \frac{\pi(x - md - d)}{d}} \end{aligned}$$

令 $x_D = \frac{x}{d}$; $y_D = \frac{y}{a}$; $\eta = \frac{a}{d}$, 则可以得到:

$$\begin{aligned} \psi_M - C &= \frac{Q\alpha}{4\pi h} \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \ln \frac{\cosh \left[\frac{\pi(y_D - m\eta)}{\eta} \right] - \cos \left[\frac{\pi(x_D - m)}{\eta} \right]}{\cosh \left[\frac{\pi(y_D - m\eta)}{\eta} \right] + \cos \left[\frac{\pi(x_D - m)}{\eta} \right]} \end{aligned}$$

由于 $\psi = \lambda_t U(x, y)$, 可以得到:

$$\begin{aligned} U(x_D, y_D) - C_1 &= \tau \cdot \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \ln \frac{\cosh \left[\frac{\pi(y_D - m\eta)}{\eta} \right] - \cos \left[\frac{\pi(x_D - m)}{\eta} \right]}{\cosh \left[\frac{\pi(y_D - m\eta)}{\eta} \right] + \cos \left[\frac{\pi(x_D - m)}{\eta} \right]} \end{aligned}$$

根据无因次压力定义, 可以得到地层压力:

$$p = p_0 + \frac{1}{\alpha} \cdot \ln \left[C_1 + \tau \cdot \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \ln \frac{\cosh \left[\frac{\pi(y_D - m\eta)}{\eta} \right] - \cos \left[\frac{\pi(x_D - m)}{\eta} \right]}{\cosh \left[\frac{\pi(y_D - m\eta)}{\eta} \right] + \cos \left[\frac{\pi(x_D - m)}{\eta} \right]} \right]$$

其中

$$\tau = Q\alpha / (4\pi h \lambda_t)$$

$$C_1 = C / \lambda_t$$

若注入井注入压力为 p_{wif} , 生产井井底压力为 p_{wf} , 则根据压力计算公式, 可得到无因次注采压差为:

$$\begin{aligned} U(1, 0) - U(0, 0) &= \frac{Q\alpha}{2\pi h \lambda_t} \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \ln \frac{\cosh(m\eta\pi) + \cos(m\pi)}{\cosh(m\eta\pi) - \cos(m\pi)} \end{aligned}$$

$$U(1, 0) = e^{\alpha(p_{wif} - p_0)}$$

$$U(0, 0) = e^{\alpha(p_{wf} - p_0)}$$

2.2 流函数计算

令 $v_i = v_o + v_w$, 由式(2)、(3)、(4)可得:

$$\bar{v}_i = -\frac{\lambda_i}{\alpha} \nabla U \quad (10)$$

通过方程(10)可以得到五点面积井网任意位置在 x, y 方向渗流速度:

$$\begin{aligned} v_{ix}(x_D, y_D) &= -\frac{\lambda_i}{\alpha} \frac{\partial U(x_D, y_D)}{\partial x_D} \frac{\partial x_D}{\partial x} \\ &= -\beta_x \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \frac{2\pi \sin[\pi(x_D - m)] \cos h[\pi(y_D - m\eta)]}{\sin h^2[\pi(y_D - m\eta)] + \sin^2[\pi(x_D - m)]} \\ v_{iy}(x_D, y_D) &= -\frac{\lambda_i}{\alpha} \frac{\partial U(x_D, y_D)}{\partial y_D} \frac{\partial y_D}{\partial y} \\ &= -\beta_y \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \frac{2\pi \sin h[\pi(y_D - m\eta)] \cos[\pi(x_D - m)]}{\sin h^2[\pi(y_D - m\eta)] + \sin^2[\pi(x_D - m)]} \end{aligned}$$

由于 $dy = a dy_D$, 通过对速度积分可以得到流函数为:

$$\begin{aligned} \Gamma &= \int a v_{ix} dy_D \\ &= -a \beta_x \cdot \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \int \frac{2\pi \sin[\pi(x_D - m)] \cos h[\pi(y_D - m\eta)]}{\sin h^2[\pi(y_D - m\eta)] + \sin^2[\pi(x_D - m)]} dy_D \\ &= -2a\pi\beta_x \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \arctan \frac{\sin h[\pi(y_D - m\eta)]}{\sin[\pi(x_D - m)]} + C_2 \end{aligned}$$

式中:

$$\begin{aligned} \beta_x &= \frac{\lambda_i [U(1,0) - U(0,0)]}{2\alpha d \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \ln \frac{\cos h(m\eta\pi) + \cos(m\pi)}{\cos h(m\eta\pi) - \cos(m\pi)}} \\ \beta_y &= \frac{\lambda_i [U(1,0) - U(0,0)]}{2\alpha a \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \ln \frac{\cos h(m\eta\pi) + \cos(m\pi)}{\cos h(m\eta\pi) - \cos(m\pi)}} \end{aligned}$$

2.3 有效动用系数计算

对于五点井网, x, y 轴上主流线均为直线。主流线任意点在 x 方向上的渗流速度为:

$$\begin{aligned} v_{ix}(x_D, 0) &= \\ &= -\beta_x \cdot \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \frac{2\pi \sin[\pi(x_D - m)] \cos h(-m\eta\pi)}{\sin h^2(-m\eta\pi) + \sin^2[\pi(x_D - m)]} \end{aligned}$$

由此可确定 x 方向上见水时间:

$$\begin{aligned} T_x &= \int_0^1 \frac{\varphi d dx_D}{v_{ix}(x_D, 0)} \\ &= \frac{-\varphi d}{\beta_x} \cdot \int_0^1 \frac{dx_D}{\sum_{m=-\infty}^{+\infty} \frac{2\pi \sin[\pi(x_D - m)] \cos h(-m\eta\pi)}{\sin h^2(-m\eta\pi) + \sin^2[\pi(x_D - m)]}} \end{aligned} \quad (11)$$

同理可确定 y 方向上见水时间:

$$T_y = \int_0^1 \frac{a\varphi dy_D}{v_{iy}(0, y_D)} = \frac{\varphi a}{\beta_y} \int_0^1 \frac{-dy_D}{\sum_{m=-\infty}^{+\infty} \frac{2\pi \cos(m\pi)}{\sin h[\pi(y_D - m\eta)]}}$$

所以可得到见水时间:

$$T = \min(T_x, T_y) \quad (12)$$

根据(12), 并利用物质平衡方法, 可得到井网单元有效动用系数为:

$$\xi = \frac{QT}{\varphi Ah} \times 100\% \quad (13)$$

由于地层均质, 井网单元有效动用系数即为无穷大面积井网有效动用系数。

2.4 含水饱和度计算

由方程(1)、(10)可得到:

$$\begin{cases} \varphi \frac{\partial S_w}{\partial t} + \bar{v}_i \cdot \nabla f_w(S_w) = 0 \\ \nabla \cdot \bar{v}_i = 0 \end{cases} \quad (14)$$

微分方程(14)特征微分方程为:

$$\frac{d\bar{\xi}}{dt} = \frac{1}{\varphi} f'_w(S_w) \bar{v}_i \quad (15)$$

沿特征线 $\bar{\xi}$ 有:

$$\frac{dS_w}{dt} = \frac{\partial S_w}{\partial t} + \frac{d\bar{\xi}}{dt} \cdot \nabla S_w = 0 \quad (16)$$

式(16)说明沿特征线含水饱和度不变, 即特征线就为等饱和度线。通过式(15)得到等饱和度面运动特征方程:

$$\frac{tf'_w(S_w)}{d\varphi} = \int_0^{x_D} \frac{d\omega}{v_{ix}(\omega, y_D)} = \int_0^{y_D} \frac{\eta d\omega}{v_{iy}(x_D, \omega)} \quad (17)$$

求解特征方程(17)可以得到任意时间地层含水饱和度分布。

3 计算实例

为研究储层有效动用情况, 以长庆油田某低渗透砂岩实际储层特性数据及生产数据为例, 对推导的数学模型进行了计算。通过室内岩心渗透率应力敏感实

验, 得到介质变形系数为 0.014 MPa^{-1} 。计算分析所采用的基础数据如表 1 所示。

3.1 典型压力场、流场分布

通过计算可以得到地层压力分布如图 2、图 3 所示。图 2 为地层某区块压力分布, 图 3 为地层某五点面积井网单元压力分布。地层压力场分布图展现了面积井网生产特征, 注入井附近区域压力值较高, 生产井附近区域地层压力值较低, 由于面积井网对称性及地层均质性, 地层压力表现为对称分布。

图 4 为地层某五点面积井网单元流场分布, 地层流场分布图展现了面积井网生产特征, 近井附近区域流线密, 远井附近区域流线疏, 主要原因在于近井附近区域生产压差大, 从而造成流线密集分布。

3.2 介质变形系数对流场分布的影响

对于不同介质变形系数, 在流函数数值相等情况下, 可得到地层流线分布示意图如图 5、图 6、图 7 所示。

表 1 模型基础数据

Table 1 The reservoir parameters of the model

参数	参数值	参数	参数值
初始渗透率/ μm^2	0.9×10^{-3}	井距/m	150
油层厚度/m	10	排距/m	120
油层孔隙度/%	14	注入量/ (m^3/d)	4
原油黏度/ $\text{mPa}\cdot\text{s}$	4.0	初始压力/MPa	20
水黏度/ $\text{mPa}\cdot\text{s}$	1.0	介质变形系数/ MPa^{-1}	0.014

由图 5、图 6 和图 7 可见, 介质变形系数越大, 流线波及面积越小。主要原因在于随着介质变形系数增大, 地层渗流阻力增大, 渗流速度减小, 从而导致流线波及面积减小。

3.3 介质变形系数对见水时间、动用程度的影响

根据得到压力计算公式, 对于不同介质变形系数, 产量与生产压差关系曲线图如图 8 所示。

从图 8 可以看出, 随着介质变形系数增大, 产量增幅随着生产压差增大而减小。主要原因在于随着生产压差增大, 地层渗透率降低, 生产阻力变大, 从而

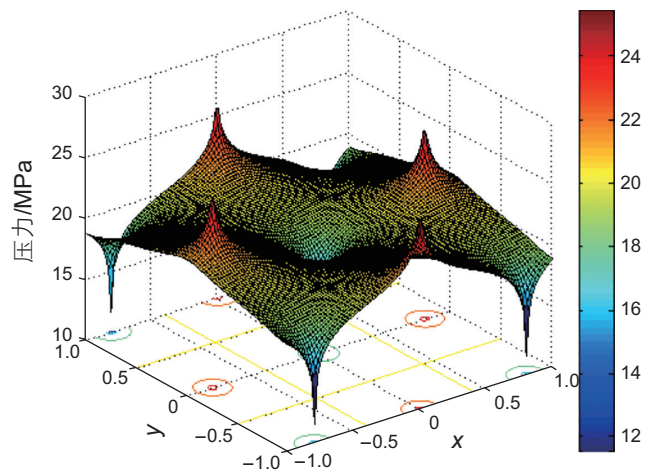


图 3 五点面积井网单元压力分布 ($\alpha=0.014 \text{ MPa}^{-1}$)

Fig. 3 Pressure field distribution of five-spot well pattern unit ($\alpha=0.014 \text{ MPa}^{-1}$)

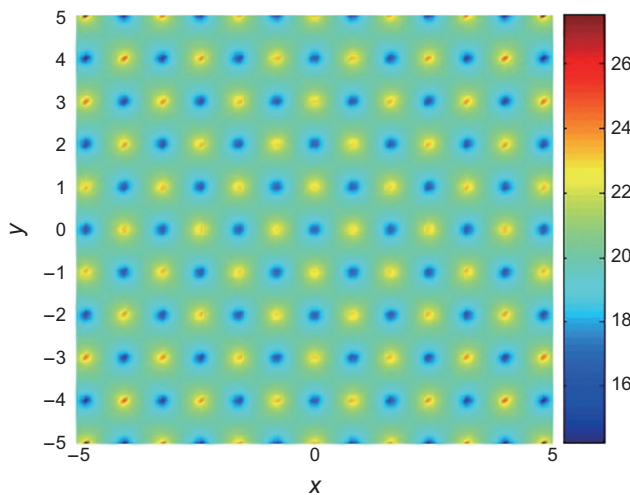


图 2 区块压力分布 ($\alpha=0.014 \text{ MPa}^{-1}$)

Fig. 2 Pressure field distribution of formation area block ($\alpha=0.014 \text{ MPa}^{-1}$)

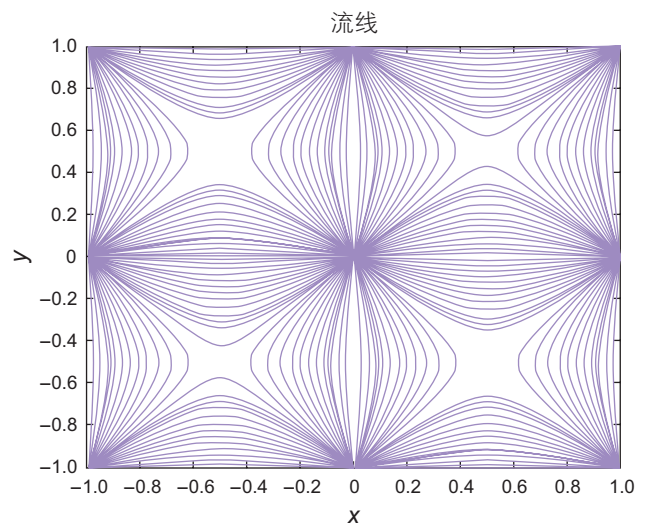


图 4 五点井网单元流场分布 ($\alpha=0.014 \text{ MPa}^{-1}$)

Fig. 4 Streamline distribution of 5-spot well pattern unit ($\alpha=0.014 \text{ MPa}^{-1}$)

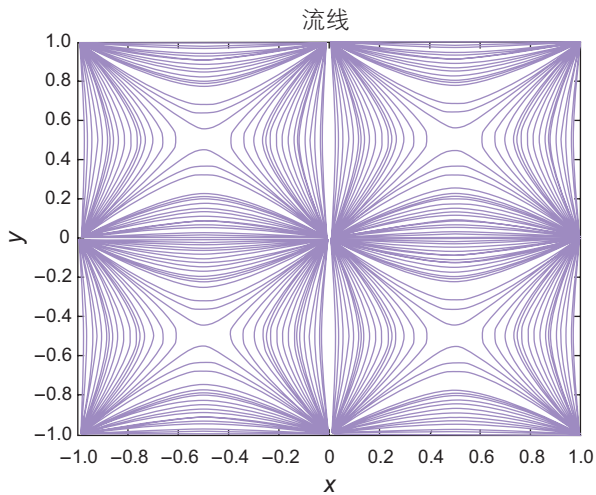


图5 流场分布 ($\alpha=0.013 \text{ MPa}^{-1}$)
Fig. 5 Streamline distribution ($\alpha=0.013 \text{ MPa}^{-1}$)

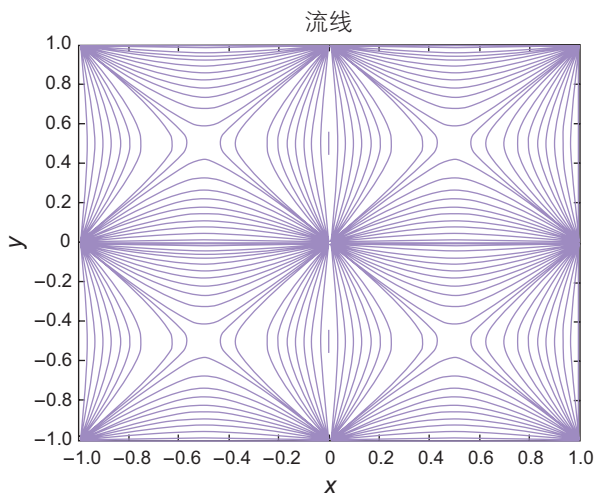


图6 流场分布 ($\alpha=0.017 \text{ MPa}^{-1}$)
Fig. 6 Streamline distribution ($\alpha=0.017 \text{ MPa}^{-1}$)

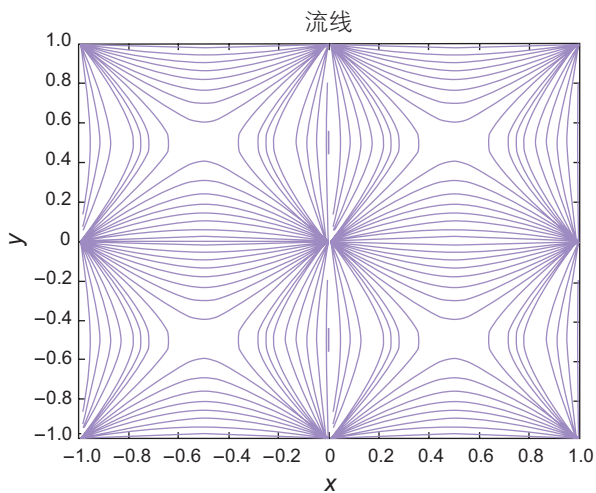


图7 流场分布 ($\alpha=0.028 \text{ MPa}^{-1}$)
Fig. 7 Streamline distribution ($\alpha=0.028 \text{ MPa}^{-1}$)

使得产量与生产压差关系不再满足达西定律。

通过式(11)、(12)可计算见水时间随介质变形系数变化规律如图9所示。

从图9可以看出,见水时间随介质变形系数增加而增大,说明多孔介质变形增大了渗流阻力,降低了流体渗流速度。

对于本文所给实例,当介质变形系数为 0.014 MPa^{-1} 时,油井见水时间为 149.6 d,现场分析结果显示油井见水时间为 166 d,本文计算结果相对误差为 9.9%,符合性较好,说明本文计算模型正确。根据式(13)可计算地层有效动用系数为 11.87%。

3.4 介质变形系数对剩余油饱和度的影响

在不同介质变形系数下,通过式(17)计算生产 50

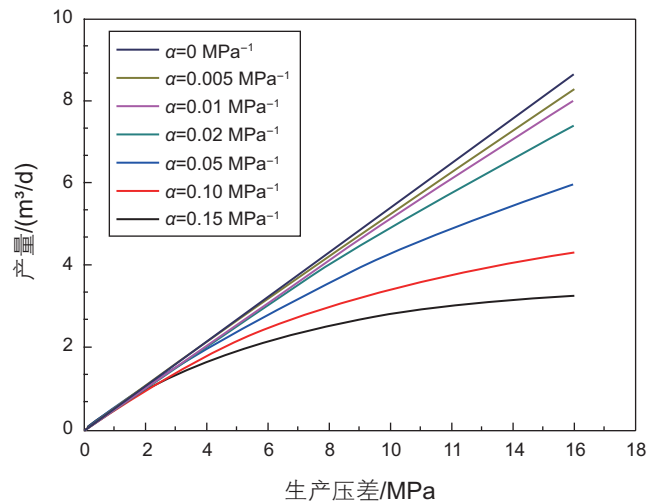


图8 产量与生产压差关系图
Fig. 8 The graph of yield and production pressure drop

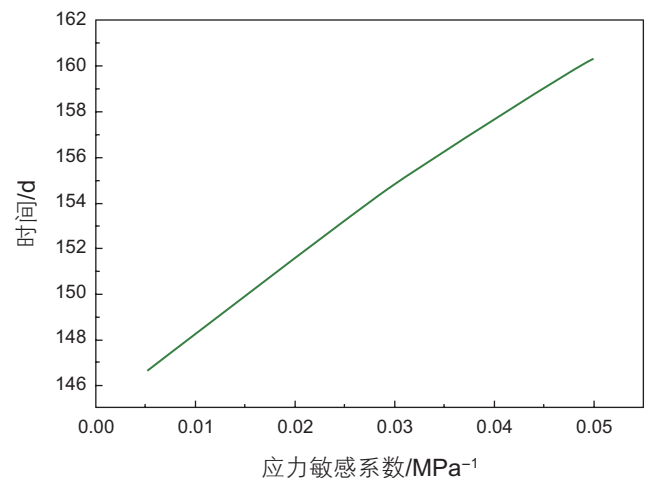


图9 见水时间与介质变形系数关系图
Fig. 9 The breakthrough time and media deformation factor

d后地层剩余油饱和度分布，结果如图 10 和图 11 所示。由图 10、图 11 可见，随着介质变形系数增大，地层剩余油饱和度增大，说明应力敏感效应不利于油藏生产，且应力敏感效应越强烈，油藏采出程度越低。

3.5 介质变形系数对水驱前缘的影响

在不同介质变形系数下，通过式(17)计算生产 130 d后地层含水饱和度分布，结果如图 12 所示。由图 12 可见，随着介质变形系数增大，水驱前缘移动距离减小。在同一位置，含水饱和度随变形系数的增大而减小。说明应力介质变形对水驱效率有不利影响，岩石应力效应越强烈，水驱油效果越差。

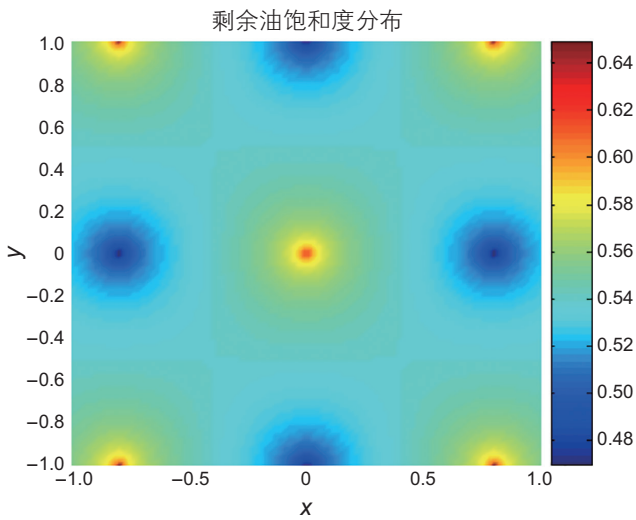


图 10 剩余油饱和度分布 ($\alpha=0.028 \text{ MPa}^{-1}$)
 Fig. 10 Remaining oil saturation distribution ($\alpha=0.028 \text{ MPa}^{-1}$)

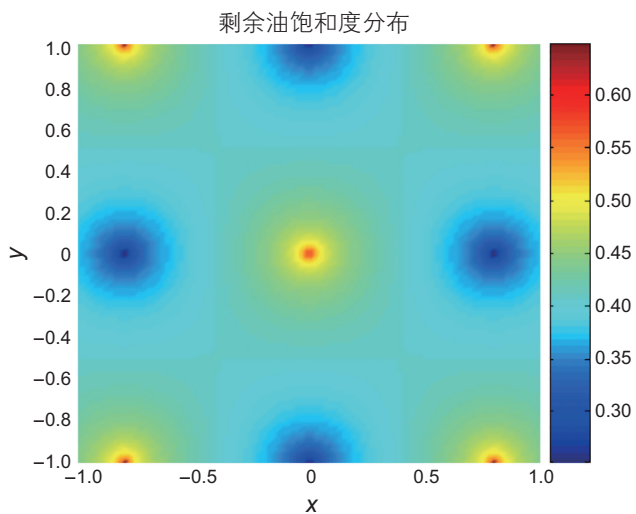


图 11 剩余油饱和度分布 ($\alpha=0.014 \text{ MPa}^{-1}$)
 Fig. 11 Remaining oil saturation distribution ($\alpha=0.01 \text{ MPa}^{-1}$)

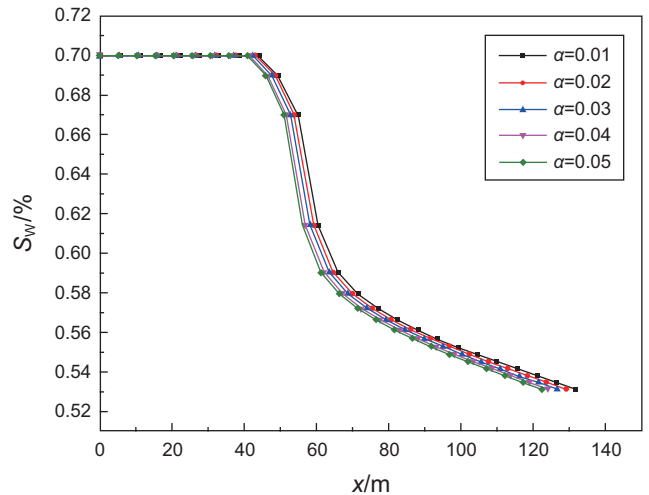


图 12 含水饱和度与介质变形系数关系图
 Fig. 12 The water saturation with media deformation factor

4 结论

(1) 基于油水两相渗流方程，结合介质变形方程，推导了考虑介质变形的五点面积井网压力、流函数解析公式。

(2) 根据地层流场分布，得到油井见水时间，结合物质平衡理论，推导出无因次井网单元有效动用系数计算公式，进而可以定量计算低渗透介质变形油田五点面积井网的有效动用系数。理论计算见水时间与实际生产情况基本一致，相对误差为 9.9%，符合性较好，说明本文计算模型正确。根据油水两相渗流方程，得到了等饱和度面运动特征方程，进而可以得到地层剩余油饱和度分布。

(3) 介质变形系数造成面积井网动用程度降低，油藏采出程度降低。随着介质变形系数增大，地层渗流阻力增大，渗流速度减小，从而导致流线波及面积减小、油井见水时间增长；同时，由于介质变形系数增大，生产阻力随生产压差的增大而增大，水驱前缘移动距离减小，进而对储层渗透率产生重大影响，使产量与生产压差的关系不再遵循达西定律，产量增幅变小。

符号注释：

式中： v —为流体渗流速度，m/d； k_0 —岩石初始渗透率， μm^2 ； $k(p)$ —地层压力为 p 时地层绝对渗透率， μm^2 ； p —地层压力，MPa； p_0 —初始地层压力，MPa； k_r —相对渗透率； μ —流体黏度，mPa·s； α —介质变形系数，1/MPa； q —源汇项，1/d； ϕ —地层孔隙度，%；

S —流体饱和度, %; t —时间, d; U —无因次压力; λ_i —混合流体粘度, $\mu\text{m}^2/(\text{mPa}\cdot\text{s})$; ∇ —Laplace算子, 表示内积; Q —油井产量, m^3/d ; C, C_1, C_2 —常数; r —距离, m; h —油层厚度, m; ψ —拟势函数, $\text{m}^2/(\text{d}\cdot\text{MPa})$; v_i —混合流体速度, m/d; T —见水时间, d; A —井网单元面积; ω —积分变量; f_w —Leverett分流函数; 下标: o—油相, w—水相; m —井排排数, n —油井或注入井井数, M —地层中任意点。

参考文献

- [1] RAGHAVAN R, MILLER F G. An investigation by numerical methods of the effect of pressure dependent rock and fluid properties on well flow tests[J]. SPE Journal, 1972, 12(3): 267–275.
- [2] 刘文超, 姚军, 李爱芬, 等. 考虑压敏效应的低渗透油藏非线性流动特征[J]. 中国科学技术大学学报, 2012, 42(2): 279–288. [LIU W C, YAO J, LI A F, et al. Nonlinear flow characteristics in low-permeability reservoirs with stress sensitive effect[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2012, 42(2):279–288.]
- [3] KIKAN J, PESTRA O A JR. Perturbation analysis of stress-sensitive reservoirs[J]. SPE Formation Evaluation, 1991, 6(3): 379–386.
- [4] SAMANIEGO V F, CINCO-LEY H. Production rate decline in pressure sensitive reservoirs[J]. JCPT, 1980, 19(3): 75–86.
- [5] FATT I, DAVIS D H. Reduction in permeability with overburden pressure[J]. Petroleum Transaction, 1952, 4(12): 34–41.
- [6] ZHANG M Y, AMBASTHA A K. New insights in pressure-transient analysis for stress-sensitive reservoirs[C]. SPE-28420- MS presented at SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 25–28 September, New Orleans, Louisiana, 1994.
- [7] 刘丽. 低渗透油藏启动压力梯度的应力敏感性实验研究[J]. 油气地质与采收率, 2012, 19(2): 81–83. [LIU L. Laboratory study on stress sensitivity of threshold pressure gradient in low permeability reservoirs[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2012, 19(2):81–83.]
- [8] PETROSA. Pressure transient response in stress-sensitive formation[C]. SPE-15115- MS presented at SPE California Regional Meeting, 2–4 April, Oakland, California, 1986.
- [9] 苏玉亮, 栾志安, 张永高. 变形介质油藏开发特征[J]. 石油学报, 2000, 21(2): 51–55. [SU Y L, LUAN Z G, ZHANG Y G. A study on development characteristics for deformed reservoir[J]. Acta Petrolei Sinica, 2000, 21(2):51–55.]
- [10] 尹洪军, 何应付. 变形介质油藏渗流规律和压力特征分析[J]. 水动力学研究与进展, 2002, 17(5): 538–546. [YIN H J, HE Y F. Analysis on flow through porous media and pressure characteristics deformed reservoirs[J]. Journal of Hydrodynamics, 2002, 17(5):538–546.]
- [11] SAMANIEGO V, BRIGHAM W E, MILLER F G. An investigation of transient flow of reservoir fluids considering pressure dependent rock and fluid properties[J]. SPE Journal, 1977, 17(2): 141–150.
- [12] 熊建, 李凌峰. 变形介质低渗透气藏水平井产能分析[J]. 天然气与石油, 2011, 29(5): 50–52. [XIONG J, LI L F. Analysis on horizontal well productivity in low permeability gas reservoirs with deformation medium[J]. Natural Gas and Oil, 2011, 29(5):50–52.]
- [13] SAMIMI S, PAK A. A three-dimensional mesh-free model for analyzing multi-phase flow in deforming porous media[J]. Meccanica, 2016, 51, 517–536, doi: 10.1007/s11012–015–0231–z.
- [14] GHORBANI J, NAZEM M, CARTER J P. Numerical modelling of multiphase flow in unsaturated deforming porous media[J]. Computers & Geotechnics, 2016, 71, 195–206, doi: 10.1016/j. compgeo.2015.09.011.
- [15] 王美楠, 尹洪军, 钟会影. 考虑二次梯度项及动边界的低渗透变形介质油藏渗流规律[J]. 大庆石油与开发 2014, 33, 75–80. [WANG M N, YIN H J, ZHONG H Y. Analysis on the seepage flow rules for low-permeability oil reservoir which deformed media considering quadratic gradient term and dynamic boundary. Daqing Petroleum Geology and Development 2014, 33, 75–80.]
- [16] 郭平, 任俊杰, 汪周华. 非达西渗流效应对低渗透气藏水平井产能的影响[J]. 天然气工业, 2011, 31 (1): 55–58. [GUO P, REN J J, WANG Z H. Impace of non-Darcy flow on the deliverability of horizontal wells in low-permeability gas reservoirs[J]. Natural Gas Industry, 2011, 31 (1):55–58.]
- [17] 张楠, 王晓琴, 徐锋, 等. 启动压力梯度和应力敏感效应对低渗透油藏直井产能的影响[J]. 特种油气藏, 2012, 19(1): 74–77. [ZHANG N, WANG X Q, XU F, et al. Effects of kickoff pressure gradient and stress sensitivity on the productivity of vertical wells in low permeability reservoirs[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2012, 19(1):74–77.]
- [18] 雷刚, 董睿涛, 杨书, 等. 致密砂岩气藏垂直裂缝井拟稳态流动产能分析[J]. 大庆石油地质与开发, 2014, 33(1): 170–174. [LEI G, DONG R T, YANG S, et al. Productivity analysis of the vertical fractured wells in pseudo steady state for tight sandstone gas reservoirs[J]. Petroleum Geology and Oilfield Development in Daqing, 2014, 33(1):170–174.]
- [19] PESAVENTO F, SCHREFLER B A, SCIUMÈ G. Multiphase flow in deforming porous media: A review[J]. Archives of Computational Methods in Engineering, 2016, 24(2): 423–448.
- [20] 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): 256–261. [JI B Y, LI L,

- WANG C Y. Oil production calculation for areal well pattern of low-permeability reservoir with non-Darcy seepage flow[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2008, 29(2):256–261.]
- [21] 何英. 低渗透油藏井网部署的油藏工程方法研究[D]. 廊坊: 中科院渗流流体力学研究所, 2009: 67–95. [HE Y. Study on well pattern arrangement of low permeability reservoir by reservoir engineering methods[D]. Langfang: CAS. Institute of Porous Flow and Fluid Mechanics, 2009: 67–95.]
- [22] 武兵厂, 姚军, 吕爱民. 水平井与垂直井联合井网波及系数研究[J]. *石油学报*, 2006, 27(4): 85–88. [WU B C, YAO J, LV A M. Research on sweep efficiency in horizontal-vertical combined well pattern[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2006, 27(4):85–88.]
- [23] 齐亚东, 雷群, 杨正明, 等. 特低渗透断块油藏不规则三角形井网有效动用系数计算及应用[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2012, 43(3): 1065–1071. [QI Y D, LEI Q, YANG Z M, et al. Calculation and application of effective development coefficient for irregular triangular patterns in extra-low permeability fault block oil reservoirs[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2012,43(3): 1065–1071.]
- [24] 吕栋梁, 唐海, 郭粉转, 等. 低渗透油田反九点井网面积波及效率影响研究[J]. *西南石油大学学报(自然科学版)*, 2012, 34(1): 147–153. [LV DO L, TANG H, GUO F Z, et al. Study of areal sweep efficiency for invert 9-spot pattern of low permeability reservoir[J]. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)*, 2012, 34(1):147–153.]
- [25] 郭粉转, 唐海, 吕栋梁, 等. 渗流启动压力梯度对低渗透油田四点井网面积波及效率影响[J]. *大庆石油学院学报*, 2010, 34(1): 33–38. [GUO F Z, TANG H, LV D L, et al. Effects of seepage threshold pressure gradient on areal sweep efficiency for 4-spot pattern of low permeability reservoir[J]. *Journal of Daqing Petroleum Institute*, 2010, 3(1):33–38.]
- [26] 郭粉转, 唐海, 吕栋梁, 等. 渗流启动压力梯度对低渗透油田五点井网面积波及效率影响[J]. *大庆石油学院学报*, 2010, 34(3): 65–68. [GUO F Z, TANG H, LV D L, et al. Effects of seepage threshold pressure gradient on areal sweep efficiency for 5-spot pattern of low permeability reservoir[J]. *Journal of Daqing Petroleum Institute*, 2010, 3(1):33–38.]
- [27] 欧阳伟平, 孙贺东, 张冕. 考虑应力敏感的致密气多级压裂水平井试井分析[J]. *石油学报*, 2018, 39(5): 570–577. [OUYANG W P, SUN Y D, ZHANG M. Well test analysis for multistage fractured horizontal wells in tight gas reservoir considering stress sensitivity [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2018, 39(5):570–577.]
- [28] 王学武, 黄延章, 杨正明. 致密储层应力敏感性研究[J]. *岩土力学*, 2010, 31, (S1): 182–186. [WANG X W, HUANG Y Z, YANG Z M. Study of stress sensitivity of tight reservoir[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31, (S1):182–186.]

(编辑 马桂霞)