



# 高压深层裂缝性油气藏中不定常渗流的数值研究

刘曰武\*, 陈维良, 刘清泉

中国科学院力学研究所工程科学部, 北京 100190

\* E-mail: lywu@imech.ac.cn

收稿日期: 2008-12-20; 接受日期: 2009-03-17

**摘要** 根据实验结果和裂缝性压力敏感地层的特性, 建立了适合于不同外边界条件下裂缝性压力敏感地层的\*\*不定常渗流模型\*\*. 推导出了裂缝性压力敏感地层的\*\*不定常渗流模型\*\*的有限元方程. 在对区域进行非结构化网格自动划分的基础上, 利用有限元计算方法计算出了无限大地层、圆形有界地层以及线性组合边界地层的裂缝性压力敏感地层的井底压力的理论曲线, 并对理论曲线特征进行了分析和对比. 确定了压力敏感系数以及有效井径组合参数对理论曲线的影响, 得到了确定压力敏感油气藏的地层参数的方法. 通过某气田高温高压深层气井的实例分析, 得到了较好的分析结果, 同时也验证该文所建立的裂缝性压力敏感地层的\*\*不定常渗流模型\*\*的正确性.

## 关键词

渗流  
不定常流动  
数学模型  
数值方法  
裂缝油气藏  
高压

随着油田开发技术的提高和对油气资源需求的日益增加, 越来越多的高压深层油气藏投入了开发. 由于深层油气藏要承受很高的压力和温度, 在开发过程中, 储层要发生部分或全部的不可逆形变. 地层形变加上液体和气体性质的变化, 会明显地影响这些油气田动态特征. 如果没有正确认识这类地层中的不定常渗流规律, 就不能给出合理的产能预测, 在这样的油气藏中, 生产井的产能会急剧下降且无法恢复, 从而导致油气藏的采收率大幅度降低. 文献[1~4]指出渗透率最大可以降低 90%, 而产量最大损失可以达到 50%.

在目前开发的油气田中, 多孔介质的变形分为三种类型: 弹性变形、塑性变形和弹塑性变形. 我们通过对室内实验数据的分析认为: 高压深层裂缝油气藏多数情况下属于塑性变形油气藏. 该类油气藏的异常特征在于高温高压下由于裂缝中的流体压力支撑裂缝张开, 当压力下降后裂缝失去流体压力支撑而张开度减小, 而且即使重新增大压力裂缝的张开程度也难以恢复, 从而导致地层孔隙度和渗透率

的降低.

裂缝性压力敏感地层是指含裂缝的多孔介质地层的性质在环境压力条件改变后发生变化的地层. 这种变化多数是不可逆过程. 所指的\*\*地层性质\*\*包括多孔介质中的骨架性质、孔隙性质以及孔隙中流体的性质. 这些性质可以通过多孔介质和流体参数进行描述, 主要参数有介质渗透率、孔隙度、流体综合压缩系数、流体密度和流体黏度等. Terzaghi<sup>[5]</sup>通过分析实验观测得到的数据认为: 在矿场计算中, 孔隙度的变化可以忽略不计, 但绝不能忽略渗透率的变化.

自从 1925 年 Terzaghi<sup>[5]</sup>在研究土的固结理论时提出有效应力概念以来, 变形介质的渗流理论经历了一个漫长的发展历程. 有效应力原理的提出为解决多孔介质储层的变形问题奠定了理论基础. 1955 年, Biot<sup>[6]</sup>将其理论推广到各向异性多孔介质的弹性固结理论. 假设孔隙中流体是可压缩的黏性流体. 对固体骨架应力与孔隙流体压力、固体骨架变形与流体运动作了区别, 将 Darcy 定律表示为流体相对于固体骨架的运动. 提出了各向异性黏弹性及有松弛现象的

应力应变关系理论. 所提出的理论可以预测流体渗流时各向异性介质中应力-应变随时间的变化历史. 1957 年, Geertsma<sup>[7]</sup>在前人工作和成果的基础上, 创立了多孔介质弹性理论及其相应的关系式, 明确地给出了岩石体积压缩系数和孔隙压缩系数的定义及其相互关系, 定量地描述了由于储层孔隙压力的变化来计算孔隙体积的变化. 1975 年, Finol 和 Farouq Ali<sup>[8]</sup>建立了考虑岩石压实效应影响液体渗流和开采动态的三维二相渗流模型, 并用有限差分法进行求解. 该模型由油、水渗流方程和一个反映多孔介质线弹性变形的解析方程组成, 考虑了岩石压实效应所引起孔隙度, 渗透率变化对最终采收率的影响, 代表了基于线弹性变形理论的渗流模型.

前苏联石油工作者<sup>[9]</sup>在线弹性岩石渗流的基础上理论上发展了弹塑性介质岩石的渗流数学模型以及塑性介质岩石的渗流数学模型, 但只是在模型中对孔隙度、渗透率对压差的变化作了修正, 将孔隙度、渗透率随压差的变化表示为指数式或幂指数式. 1972 年 Raghavan 等人<sup>[10]</sup>建立了压力敏感对渗透率影响的均质地层的不定常渗流模型, 给出了新的拟压力的定义公式, 将渗透率随压力的变化考虑在拟压力项中, 这种方法将非线性方程进行了较好的拟线性化处理, 并得到了压力敏感条件下的数值解. 1977 年, Samaniego 等人<sup>[11]</sup>建立了考虑岩石和流体压缩性质随压力变化的不定常渗流模型. 1983 年, Ostensen<sup>[12]</sup>研究表明对于典型致密砂岩气藏, 压力敏感可导致初始产能减少多达 30%. 同时指出, 应用不考虑压力敏感渗流模型分析不稳定压力动态会产生巨大偏差. 1990 年, Pedrosa<sup>[13]</sup>建立了均质圆形地层的变形介质的不定常渗流模型, 利用摄动理论求得了方程的零阶、一阶和二阶摄动解, 对变形介质中的流动特征作了简要分析. 同年, Zhang 等人<sup>[14]</sup>应用数值解的方法研究了无限大径向流均质系统压力敏感性油气藏压力动态特征问题. 1993 年, Yeung<sup>[15]</sup>建立了均质地层中变形介质的球形不定常渗流模型, 给出了模型的近似解, 适合于部分不完善井的不定常渗流研究, 但精确程度较低.

2000 年, Wu 和 Pruess<sup>[16]</sup>给出了考虑压力敏感对渗透率影响的不定常渗流模型, 给出了积分形式的解, 并将积分解与数值解进行了比较, 得到了渗透率

随压力变化时注入压力的变化规律. 2001 年, Davies 等人<sup>[17]</sup>给出了考虑压力敏感地层的渗透率的变化规律, 建立了压力敏感地层的渗透率变化的数学模型. 2002 年, Osorio 和 Alcalde<sup>[18]</sup>研究了如何用试井方法确定岩石变形对地层性质的影响, 建立了应力变形条件下的 3D 模型, 通过应力-应变关系和流体运动方程的有限差分计算, 得到了主应力的径向变化规律, 渗透率沿径向的变化规律以及井底压力随时间的变化规律. 2003 年, Samaniego 和 Villalobos<sup>[19]</sup>给出了压力敏感天然裂缝地层的不定常渗流模型, 其研究核心是流体的压缩性和裂缝孔隙的压缩性, 并采用的是 1972 年 Raghavan 提出的拟压力方法, 将渗透率的变化包含在拟压力函数中. 主要解决了不稳定试井分析中的半对数分析问题, 并用实例作了相应的验证.

2003 年, Gang 和 Dusseault<sup>[20]</sup>形象地给出了近井区域压力敏感地层的孔隙度和渗透率的变化规律和计算模型. 从理论上研究了一口井生产时井周围应力的变化, 压力的变化特性以及由于周围应力变化引起的储层压实所造成井周围储层伤害的问题, 得出了由于应力引起的井周围储层岩石压实使产量随生产时间增加而急剧降低的结论. 这对于研究压力敏感地层的不定常渗流规律有着积极的意义. 2007 年, Shunde 等人<sup>[21]</sup>建立了超压条件下, 孔隙弹性特征与地层压力的关系, 得到了地层压力在不同强度地层中随时间的变化规律.

国内 Zhou、葛家理、同登科、苏玉亮、董平川、王延峰等人<sup>[22~27]</sup>对变形介质油藏的不同方面进行了理论分析.

近年来由于我国西部油田深层超高压油气藏的大量开发, 变形介质油气藏的研究再次成为石油天然气工程的研究热点之一. 由于过去的研究主要集中在弹性变形介质和弹塑性变形介质油藏, 主要理论依据是渗透率随压力变化. 而对于塑性变形介质油藏国内外研究较少. 本文重点研究塑性介质的变形对多孔介质内流体流动的影响. 在前人已有的研究基础上, 本文利用描述储层岩石孔隙度、渗透率随压力变化的指数关系, 建立了考虑孔隙度和渗透率的变化不定常渗流模型; 利用有限元对方程进行求解, 得到了孔隙度、渗透率单独变化和耦合变

化条件下的不定常渗流规律; 分析了孔隙度、渗透率变化规律对井底压力的影响特征; 通过矿场实例分析验证了所建立的不定常渗流模型的正确性, 并得到实际地层渗透率变化模量。

## 1 数学模型

### 1.1 物理模型描述

(i) 假设地层为均质等厚气藏, 并以定产量  $q$  进行生产;

(ii) 地层内流动的流体为单相微可压缩牛顿流体;

(iii) 在地层中作平面径向流动, 流动满足达西定律, 忽略重力和毛管力的影响;

(iv) 裂缝地层包括孔隙和裂缝两种介质。地层中裂缝是流体流动通道, 孔隙介质/基质中的流体为主要供源, 流体从基质向裂缝的流动为稳态窜流;

(v) 假定地层渗透率、孔隙度随有效应力呈指数式变化, 渗透率模量  $\alpha_k$  和孔隙度模量  $\alpha_\phi$  均为常数;

(vi) 井筒内边界条件考虑井筒存储和表皮系数的影响, 使用有限井径模型进行处理;

(vii) 地层外边界可以是无限大地层、圆形地层或线性组合边界, 边界的性质可以是定压的也可以是封闭的;

(viii) 流体不定常渗流的整个过程为等温过程。

## 1.2 数学模型的建立

### 1.2.1 质量连续性方程

根据 Warren 等人<sup>[28]</sup>提出的双重介质拟稳态窜流的不定常渗流模型。对于裂缝性压力敏感地层的裂缝中的质量连续性方程为

$$\frac{\partial(\rho\phi_f)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V_f) - q_m = 0, \quad (1)$$

基质中的质量连续性方程为

$$\frac{\partial(\rho\phi_m)}{\partial t} + q_m = 0, \quad (2)$$

基质向裂缝窜流的流量方程为

$$q_m = \alpha_\lambda \frac{\rho_0}{\mu} (p_m - p_f), \quad (3)$$

其中  $q_m$  为基质与裂缝介质之间的流体窜流量,  $\alpha_\lambda$  为基质与裂缝介质之间的流体窜流系数。

### 1.2.2 流体密度变化

等温条件下, 流体压缩系数定义为  $c_f = -\frac{1}{V} \frac{dV}{dp} =$

$\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dp}$ 。对流体压缩系数公式进行积分得到流体密度

的变化规律:

$$\rho = \rho_0 e^{-c_f(p_i - p)}. \quad (4)$$

在压差较小的条件下:  $\rho = \rho_0 [1 + c_f(p_i - p)]$ 。

### 1.2.3 多孔介质的孔隙变化

Hall 在 1953 年通过实验定义了岩石的有效压缩系数, 即单位压力变化条件下所引起的孔隙体积的

相对变化为  $c_p = \frac{1}{V_p} \frac{dV_p}{dp}$ 。此式等价于孔隙压缩系数:

$$C_\phi = \frac{1}{\phi} \frac{d\phi}{dp}.$$

对孔隙压缩系数公式进行积分得到:

$$\phi = \phi_0 e^{-C_\phi(p_i - p)}, \quad (5)$$

在压差较小的条件下:  $\phi = \phi_0 [1 + C_\phi(p_i - p)]$ 。对于裂缝和孔隙介质, 其孔隙度的变化规律分别为

$$\phi_f = \phi_{f0} e^{-C_{\phi_f}(p_i - p)}, \quad (6)$$

$$\phi_m = \phi_{m0} e^{-C_{\phi_m}(p_i - p)}. \quad (7)$$

### 1.2.4 多孔介质的渗透性变化

实验研究表明, 高温高压条件下岩石的渗透率与压力之间的关系为  $\alpha_k = \frac{1}{k_0} \frac{dk}{dp}$ ,  $\alpha_k$  称为岩石变形系数, 或称为渗透率模量。

对渗透率模量公式进行积分得到:

$$k = k_0 e^{-\alpha_k(p_i - p)}, \quad (8)$$

对于裂缝介质, 其渗透率变化规律为

$$k_f = k_{f0} e^{-\alpha_{k_f}(p_i - p)}. \quad (9)$$

由于孔隙介质的渗透率远小于裂缝介质渗透率, 类似于 Warren 和 Root 的定常孔隙渗透率模型, 其渗透率的变化在本文模型中不予以考虑。

### 1.2.5 流体运动方程

裂缝介质中流体运动方程可以用达西定律描述:

$$V_f = -\frac{k_f}{\mu} \nabla p_f. \quad (10)$$

### 1.3 数学模型的有量纲形式

将运动方程和状态方程代入连续性方程(1)~(3), 可以得到运动控制方程. 其不定常渗流控制方程为

$$\phi_{f0}\rho_0 \frac{\partial \left( e^{(C_{\phi_f} + C_f)(p-p_i)} \right)}{\partial t} - \frac{k_0\rho_0}{\mu} \times \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ e^{(\alpha_{\phi_f} + C_f)(p-p_i)} \frac{\partial p_f}{\partial x_i} \right] - \frac{\alpha_\lambda \rho_0}{\mu} (p_m - p_f) = 0. \quad (11)$$

窜流方程:

$$\phi_{m0}\rho_0 \frac{\partial \left( e^{(\alpha_{\phi_m} + \alpha_p)(p-p_i)} \right)}{\partial t} + \frac{\alpha_\lambda \rho_0}{\mu} (p_m - p_f) = 0. \quad (12)$$

初始条件:

$$t = 0, \quad p_f = p_m = p_i, \quad (13)$$

内边界条件:

$$r = r_w, \quad qB = \left[ C \frac{dp_w}{dt} - \frac{2\pi h}{\mu} k(p_f) \left( r \frac{\partial p_f}{\partial r} \right) \right], \quad (14)$$

$$r = r_w, \quad p_w = \left[ p_f - Sr \frac{dp_w}{dr} \right]. \quad (15)$$

外边界条件:

$$r \rightarrow \infty, \quad p_f = p_m = p_i \text{ (无限大地层)}, \quad (16)$$

$$r = r_e, \quad p_f = p_m = p_i \text{ (圆形定压边界)}, \quad (17)$$

$$r = r_e, \quad \frac{\partial p_f}{\partial r} = \frac{\partial p_m}{\partial r} = 0 \text{ (圆形封闭边界)}, \quad (18)$$

$$x, y \in \Gamma_i, \quad p_f = p_m = p_i \text{ (线性定压边界)}, \quad (19)$$

$$x, y \in \Gamma_j, \quad \frac{\partial p_f}{\partial n} = \frac{\partial p_m}{\partial n} = 0 \text{ (线性封闭边界)}, \quad (20)$$

其中  $B$  为流体体积系数, 单位为  $\text{m}^3/\text{m}^3$ ;  $C$  为井筒存储系数, 单位为  $\text{m}^3/\text{MPa}$ ;  $C_t$  为总压缩系数, 单位为  $\text{m}^3/\text{MPa}$ ;  $h$  为地层有效厚度, 单位为  $\text{m}$ ;  $k$  为地层渗透率, 单位为  $\mu\text{m}^2$ ;  $p$  为地层压力, 单位为  $\text{MPa}$ ;  $p_f$  是裂缝介质之中的压力, 单位为  $\text{MPa}$ ;  $p_i$  是地层原始压力, 单位为  $\text{MPa}$ ;  $p_m$  为基质之中的压力, 单位为  $\text{MPa}$ ;  $p_w$  是井底压力, 单位为  $\text{MPa}$ ;  $q$  为日产量, 单位为  $\text{m}^3/\text{d}$ ;  $r$  为距离, 单位为  $\text{m}$ ;  $r_e$  为地层边界距离, 单位为  $\text{m}$ ;  $r_w$  为油井半径, 单位为  $\text{m}$ ;  $S$  为表皮系数, 单位是无量纲

量;  $t$  为时间, 单位为  $\text{h}$ ;  $\phi_f$  为地层裂缝介质的孔隙度, 单位是无量纲量(小数);  $\phi_m$  为地层基质的孔隙度, 单位是无量纲量(小数);  $\mu$  为地层中流体的黏度, 单位为  $\text{mPa} \cdot \text{s}$ ;  $\rho_0$  为参考状态下的流体密度, 单位为  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $\Gamma_i$  和  $\Gamma_j$  线性边界.

### 1.4 无量纲数学模型

#### 1.4.1 数学模型无量纲化

为了使所建立的不定常渗流模型具有更普适化, 将数学模型进行无量纲化, 得到的无量纲数学模型如下.

无量纲渗流控制方程为

$$\omega e^{-C_{\phi_D} p_{mD}} \frac{\partial p_{fD}}{\partial t_D} - \frac{\partial}{\partial x_{iD}} \left[ e^{-\alpha_{\phi_D} p_{fD}} \frac{\partial p_{fD}}{\partial x_{iD}} \right] - \lambda (p_{mD} - p_{fD}) = 0. \quad (21)$$

窜流方程:

$$(1-\omega) e^{-C_{mD} p_{mD}} \frac{\partial p_{mD}}{\partial t_D} + \lambda (p_{mD} - p_{fD}) = 0, \quad (22)$$

初始条件:

$$t_D = 0, \quad p_{fD} = p_{mD} = 0, \quad (23)$$

内边界条件:

$$r_D = 1, \quad -1 = C_D \frac{\partial p_{wD}}{\partial t_D} + e^{-\alpha_{\phi_D} p_{fD}} \frac{\partial p_{fD}}{\partial r_D}, \quad (24)$$

$$r_D = 1, \quad p_{wD} = \left[ p_{fD} - Sr_D \frac{dp_{wD}}{dr_D} \right], \quad (25)$$

外边界条件:

$$r_D \rightarrow \infty, \quad p_{fD} = p_{mD} = 0 \text{ (无限大地层)}, \quad (26)$$

$$r_D = r_{eD}, \quad p_{fD} = p_{mD} = 0 \text{ (圆形定压边界)}, \quad (27)$$

$$r_D = r_{eD}, \quad \frac{\partial p_{fD}}{\partial r_D} = \frac{\partial p_{mD}}{\partial r_D} = 0 \text{ (圆形封闭边界)}, \quad (28)$$

$$x_D, y_D \in \Gamma_i, \quad p_{fD} = p_{mD} = 0 \text{ (线性定压边界)}, \quad (29)$$

$$x_D, y_D \in \Gamma_j, \quad \frac{\partial p_{fD}}{\partial n} = \frac{\partial p_{mD}}{\partial n} = 0 \text{ (线性封闭边界)}, \quad (30)$$

其中的无量纲量的定义式如下.

无量纲裂缝压力:

$$p_{fD} = \frac{hk_{f0}}{1.842 \times 10^{-3} qB\mu} (p_i - p_f),$$

无量纲孔隙压力:

$$p_{mD} = \frac{hk_{f0}}{1.842 \times 10^{-3} qB\mu} (p_i - p_m),$$

无量纲距离:  $r_D = \frac{r}{r_w}, \quad x_D = \frac{x}{r_w}, \quad y_D = \frac{y}{r_w},$

无量纲时间:  $t_D = \frac{k_{f0}}{(\phi_f C_{yf} + \phi_m C_{im}) \mu r_w^2} t,$

无量纲井储系数:  $C_D = \frac{C}{2\pi h(\phi_f C_{yf} + \phi_m C_{im}) r_w^2},$

储能系数:  $\omega = \frac{\phi_f C_{yf}}{\phi_f C_{yf} + \phi_m C_{im}},$

窜流系数:  $\lambda = \frac{\alpha \lambda_w r_w^2}{k_{f0}},$

无量纲变形系数:  $\beta = \frac{1.842 \times 10^{-3} \alpha_k qB\mu}{k_0 h}.$

### 1.4.2 数学模型的拟线性化处理

为了便于方程计算, 对该强非线性化方程进行拟线性化处理, 处理结果如下:

$$\frac{\omega}{C_D e^{2S}} \frac{\partial U_f}{\partial T_D} - \frac{\partial}{\partial x_{iD}} \left[ U_f^{\frac{\alpha_{kD}-1}{C_{yf}}} \frac{\partial U_f}{\partial x_{iD}} \right] - \lambda_D \left( \frac{C_{yf}}{C_{im}} U_m - U_f \right) = 0, \quad (31)$$

$$\frac{1-\omega}{C_D e^{2S}} \frac{C_{yf}}{C_{im}} \frac{\partial U_m}{\partial t_D} + \lambda \left( \frac{C_{yf}}{C_{im}} U_m - U_f \right) = 0. \quad (32)$$

初始条件:

$$U_f(R_D, 0) = U_m(R_D, 0) = 1. \quad (33)$$

内边界条件:

$$R_D \frac{\partial U_f}{\partial R_D} \Big|_{R_D=1} = \beta + \frac{1}{U_f} \frac{\partial U_f}{\partial T_D}, \quad (34)$$

外边界条件:

$$U_f(R_D \rightarrow \infty, T_D) = U_m(R_D \rightarrow \infty, T_D) = 1 \quad (\text{无限大地层}), \quad (35)$$

$$U_f(R_{eD}, T_D) = U_m(R_{eD}, T_D) = 1 \quad (\text{圆形定压边界}), \quad (36)$$

$$\frac{\partial U_f(R_{eD}, T_D)}{\partial R_D} = \frac{\partial U_m(R_{eD}, T_D)}{\partial R_D} = 0 \quad (\text{圆形封闭边界}), \quad (37)$$

$$x_D, y_D \in \Gamma_i, \quad U_{fD} = U_{mD} = 1 \quad (\text{线性定压边界}), \quad (38)$$

$$x_D, y_D \in \Gamma_i, \quad \frac{\partial U_{fD}}{\partial n} = \frac{\partial U_{mD}}{\partial n} = 0 \quad (\text{线性封闭边界}), \quad (39)$$

其中  $T_D = t_D / C_D, \quad U_f = e^{-C_{yD} P_{fD}}, \quad U_m = e^{-C_{mD} P_{mD}}, \quad R_D = \frac{r}{r_w e^{-S}}, \quad \lambda_D = \lambda e^{-2S}.$

## 2 数学模型求解

### 2.1 有限元方程

利用伽辽金有限元法求解以上数学模型. 取权函数等于插值函数  $\varphi_i$ , 并令在单元整个区域上加权余量的积分为零. 将模型变为有限元方程:

$$\iint_A \varphi_i^e \left\{ \frac{\omega}{C_D e^{2S}} \frac{\partial U_f^e}{\partial T_D} - \frac{\partial}{\partial x_{iD}} \left[ U_f^e \frac{C_{yf}}{C_{im}} \frac{\partial U_f^e}{\partial x_{iD}} \right] - \lambda_D \left( \frac{C_{yf}}{C_{im}} U_m^e - U_f^e \right) \right\} dA = 0, \quad (i=1, 2, 3), \quad (40)$$

$$\iint_A \varphi_i^e \left[ \frac{1-\omega}{C_D e^{2S}} \frac{C_{yf}}{C_{im}} \frac{\partial U_m^e}{\partial t_D} + \lambda \left( \frac{C_{yf}}{C_{im}} U_m^e - U_f^e \right) \right] dA = 0 \quad (i=1, 2, 3), \quad (41)$$

其中  $\varphi_i^e$  为单元插值函数, 取线性插值:  $\varphi_i^e = a_i + b_i x + c_i y \quad (i=1, 2, 3).$

$$\frac{\partial \varphi_1^e}{\partial x} = b_1, \quad \frac{\partial \varphi_2^e}{\partial x} = b_2, \quad \frac{\partial \varphi_3^e}{\partial x} = b_3,$$

$$\frac{\partial \varphi_1^e}{\partial y} = c_1, \quad \frac{\partial \varphi_2^e}{\partial y} = c_2, \quad \frac{\partial \varphi_3^e}{\partial y} = c_3.$$

$$a_1 = \frac{1}{2A} (x_2 y_3 - x_3 y_2), \quad a_2 = \frac{1}{2A} (x_3 y_1 - x_1 y_3),$$

$$a_3 = \frac{1}{2A} (x_1 y_2 - x_2 y_1), \quad b_1 = \frac{1}{2A} (y_2 - y_3),$$

$$b_2 = \frac{1}{2A} (y_3 - y_1), \quad b_3 = \frac{1}{2A} (y_1 - y_2),$$

$$c_1 = \frac{1}{2A} (x_3 - x_2), \quad c_2 = \frac{1}{2A} (x_1 - x_3),$$

$$c_3 = \frac{1}{2A} (x_2 - x_1),$$

$A$  为三角形的面积:

$$A = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ x_1 & x_2 & x_3 \\ y_1 & y_2 & y_3 \end{vmatrix}$$

$$= \frac{1}{2} (x_2 y_3 + x_1 y_2 + x_3 y_1 - x_2 y_1 - x_3 y_2 - x_1 y_3),$$

$$U^e = U_1^e j_1^e + U_2^e j_2^e + U_3^e j_3^e,$$

其中  $U_1^e$ ,  $U_2^e$  和  $U_3^e$  为单元三个结点的值, 于是

$$\frac{\partial U^e}{\partial x} = U_1^e \frac{\partial \varphi_1^e}{\partial x} + U_2^e \frac{\partial \varphi_2^e}{\partial x} + U_3^e \frac{\partial \varphi_3^e}{\partial x}, \quad (42)$$

$$\frac{\partial U^e}{\partial y} = U_1^e \frac{\partial \varphi_1^e}{\partial y} + U_2^e \frac{\partial \varphi_2^e}{\partial y} + U_3^e \frac{\partial \varphi_3^e}{\partial y}. \quad (43)$$

最后由单元方程组组装系统方程组. 求解系统方程组, 即可得到  $(x, y)$  点  $n+1$  时刻的  $U(x, y)$ . 再由  $U(x, y)$  计算出  $p(x, y)$  值.

### 2.2 网格划分

应用有限元法求解微分方程定解问题, 首先将求解区域用点、线或面剖分为有限数目的单元. 本文主要是利用 20 世纪 90 年代提出的改进 Delaunay 三角剖分的 Watson 算法而形成的有限元非结构三角形网格生成的自适应技术, 对所研究油藏进行网格划分. 对于单井压力不定常渗流问题, 由于在井筒附近地层压力变化非常大, 远离井筒区域压力变化小, 因此, 在网格划分上, 近井地带要加密, 以保证解的精确性, 远离井筒地带可以采用较稀疏的网格. 图 1 是圆形外边界油藏中心一口单井渗流时的三角形网格图, 图 2 是放大后的近井区域的网格图. 对近井地带的网格划分可以任意加密.

### 2.3 有限元程序设计

应用有限元法求解试井分析数学模型的计算机程序框图如图 3 所示. 按图 3 所示的计算机框图编制了相应的有限元计算程序. 通过有限元计算, 可以得到不同时刻井底压力和压力导数的双对数理论曲线.

## 3 裂缝性压力敏感地层的理论曲线特征分析

### 3.1 无限大裂缝性压力敏感地层的理论曲线

根据所建立的裂缝性压力敏感地层的不定常渗流模型, 计算得到了无限大外边界条件下考虑以下

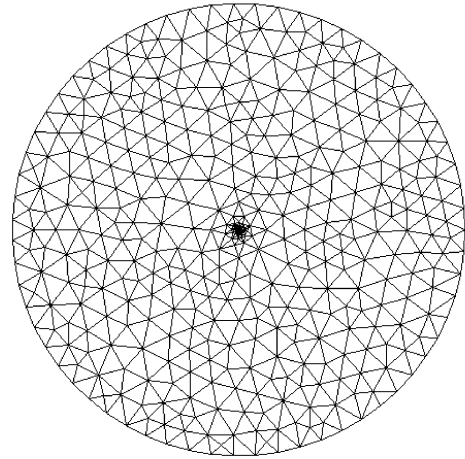


图 1 圆形油气藏三角网格图

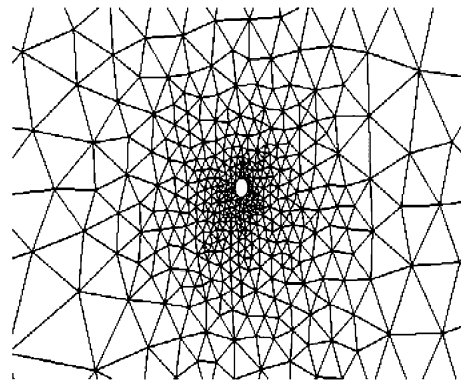


图 2 近井区域的网格图

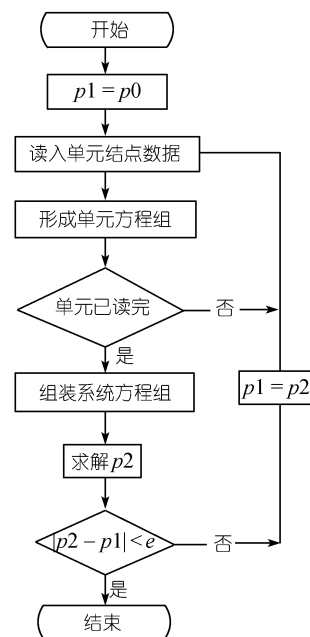


图 3 有限元计算程序框图

4 种情况下的井底压力随时间变化的理论曲线, 如图 4 所示.

- (i) 只考虑渗透率变化;
- (ii) 只考虑孔隙度变化;
- (iii) 同时考虑渗透率和孔隙度变化;
- (iv) 同时不考虑渗透率和孔隙度变化.

从图 4 中可以看出: (i) 只有孔隙度变化时, 压力和压力导数曲线与非压力敏感地层的理论曲线相差不多. 这与文献[5]的实验结论是一致的. 这里给出了明确的定量结果, 并且通过与非压力敏感地层计算结果的对比, 说明了本文所建立的不定常渗流模型的正确性. (ii) 同时考虑渗透率和孔隙度变化时, 其理论曲线与只考虑渗透率变化的理论曲线的差别并不明显, 因为孔隙度变化对理论曲线的影响较小, 这与文献[5]的实验结果也是一致的. (iii) 只要考虑压力敏感作用, 理论曲线与不考虑压力敏感作用的理论曲线都存在一定差别. 这些结论与目前的定性认识是一致的, 并且得到了定量化的差别.

### 3.2 圆形封闭裂缝性压力敏感地层的理论曲线

根据所建立的裂缝性压力敏感地层的不定常渗流模型, 计算得到了圆形封闭外边界条件下不同渗透率模量变化时的理论曲线, 如图 5 所示. 从图 5 可以看出, (i) 随着渗透率模量的增大, 裂缝性压力

敏感地层的压力曲线向上偏离非压力敏感地层的压力曲线, 其压力导数曲线向下偏离非压力敏感地层的压力曲线. (ii) 随着渗透率模量的增大, 裂缝性压力敏感地层的压力曲线与其压力导数的曲线的距离增大. 由此可以推断出, 该类地层试井数据若用常规试井软件解释, 表皮系数解释结果可能异常. (iii) 随着渗透率模量的增大, 对边界距离的反映的时间的变化影响不大.

另外从图 5 的压力导数曲线可以看出, 典型曲线可以划分为 5 个阶段:

- (i) 纯井筒储存阶段, 压力和压力导数曲线的斜率为 1.0.
- (ii) 续流与压力敏感影响共同作用阶段: 随着渗透率模量的增大, 过渡段持续的时间逐渐减少.
- (iii) 双重介质特征反映阶段: 与常规双重介质地层的反映特征一样表现为压力导数曲线上的一个几乎对称凹陷区域.
- (iv) 无限径向流阶段: 导数曲线与常规无限大均质地层有着明显的区别. 常规无限大均质地层在径向流阶段导数值恒等于 0.5, 而压力敏感地层在径向流阶段导数值是小于 0.5 的一个常数.
- (v) 外边界反映段: 由于是圆形封闭地层, 在探测到边界时压力导数上翘, 并与压力曲线合并为斜率为 1 的直线段.

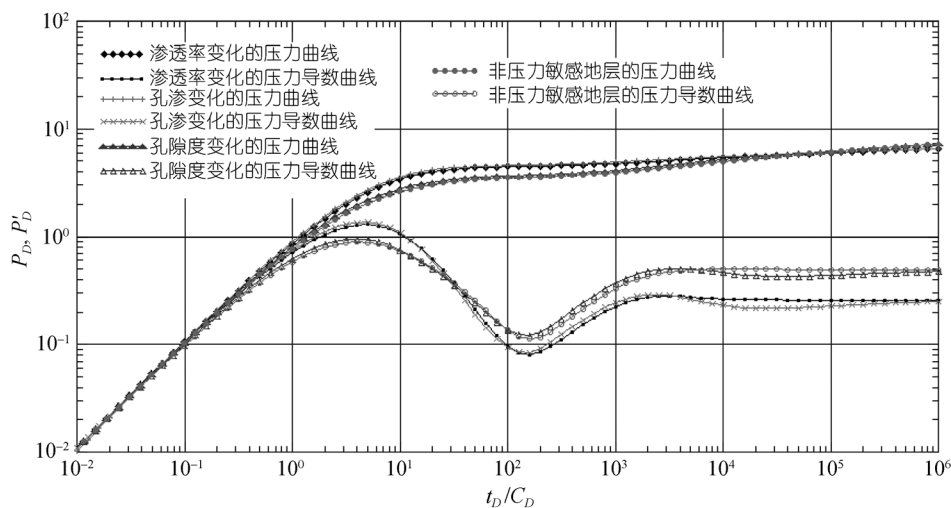


图 4 无限大裂缝性压力敏感地层的理论曲线

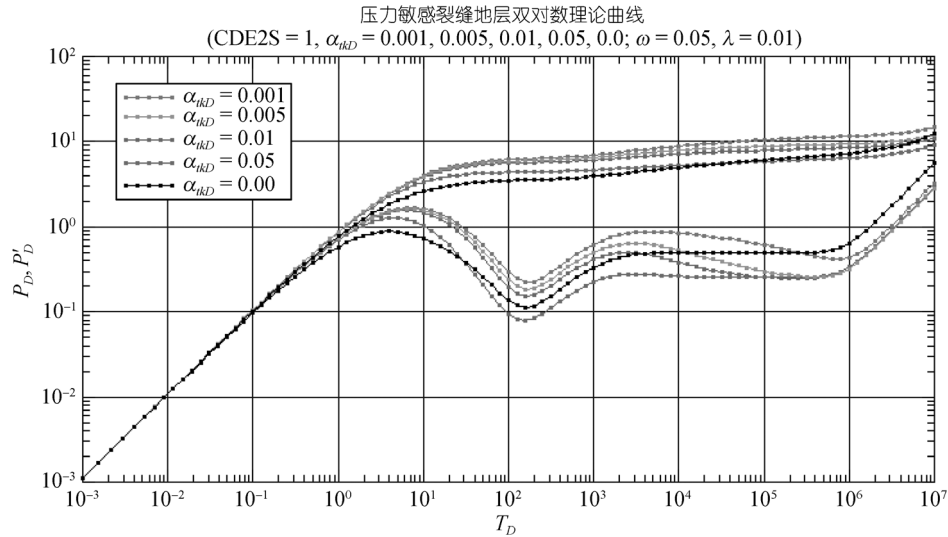


图 5 圆形封闭压力敏感地层的井底压力和压力导数理论曲线

### 3.3 线性组合四边形边界裂缝性压力敏感地层的理论曲线

为了验证理论模型的正确性和计算方法的实用性, 本文计算了线性组合四边形混合外边界条件下的裂缝性压力敏感地层的理论曲线. 计算区域中 3 条线性边界为封闭边界, 一条边界为定压边界. 计算区域的网格图如图 6 所示, 理论曲线的计算结果如图 7 所示. 从图 7 可以看出, 压力波在传播过程中遇到封闭边界压力下降, 压差增大, 压力曲线和压力导数曲线上翘. 遇到定压边界压力保持恒定, 压力导数曲线下降, 这与非压力敏感地层的边界反映是一致的.

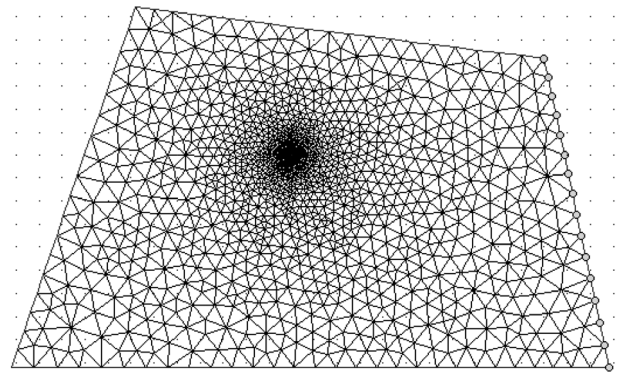


图 6 计算区域的网格

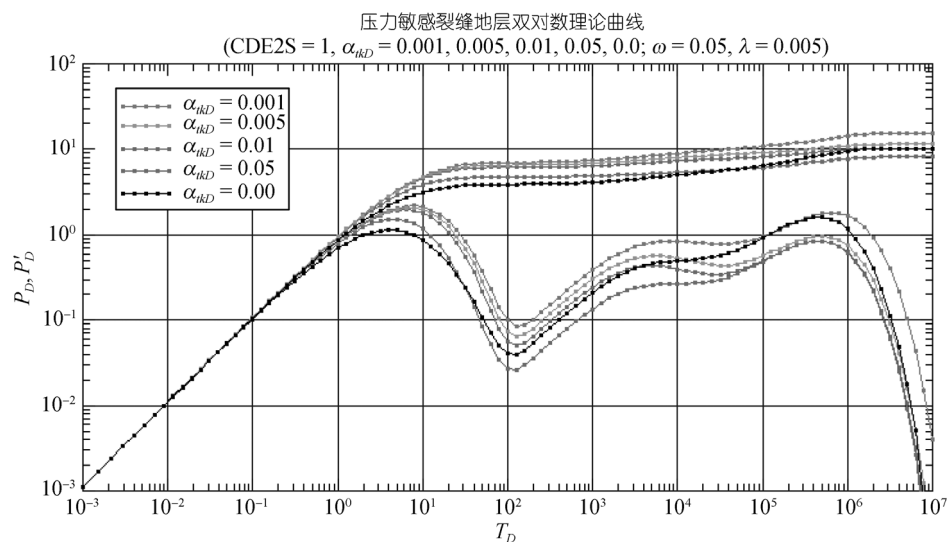


图 7 四边形混合边界理论曲线的计算结果



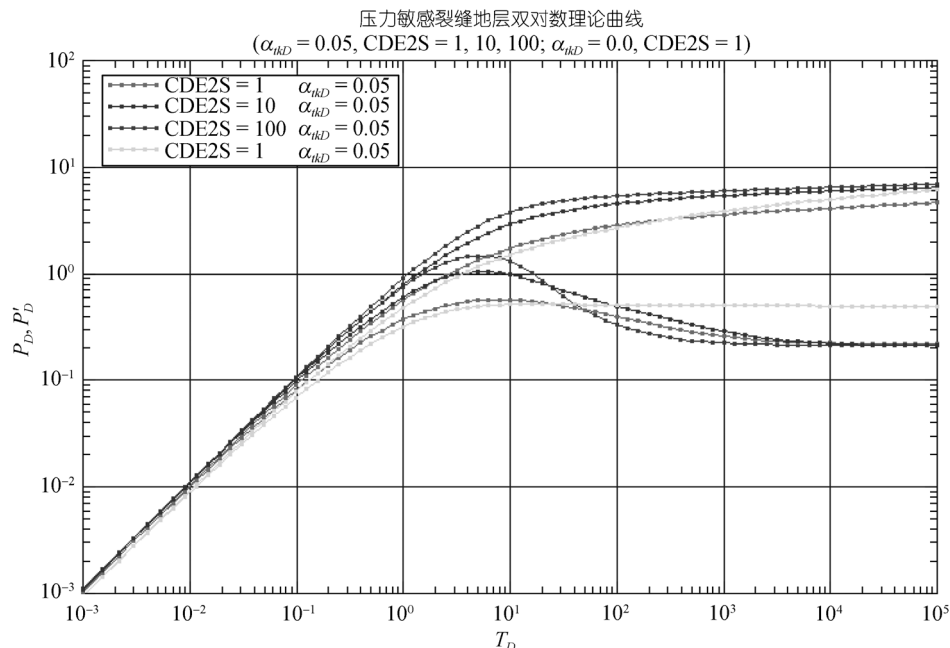


图8 均质无限大压力敏感地层的理论曲线

### 3.4 裂缝性压力敏感地层的理论曲线的简化分析

本研究所得到的裂缝性压力敏感地层的非常渗流模型, 可以蜕化到均质砂岩压力敏感地层, 因此本文的研究结果具有一定的普适性. 蜕化到均质压力敏感地层时的压力和压力导数理论曲线如图8所示.

## 4 实际井例分析

为了验证裂缝性压力敏感地层非常渗流模型的正确性和计算方法的实用性, 本研究就中国西部某油田多口高压深层井的现场测试数据进行了分析, 获得了较好的分析成果并且这些成果已用于该油田开发方案的设计之中. 现以其中一例说明裂缝性压力敏感地层非常渗流模型的应用.

### 4.1 某井基本情况介绍

该井完井井深 5101 m, 属高压超深井, 测试难度较大. 经过历时 12 d 的系统测试, 完成了系统试井的任务, 获得了较为完整的测试资料. 测试历史资料如图9所示.

### 4.2 某井试井资料分析成果图

根据测试资料的分析要求, 双对数拟合分析图、

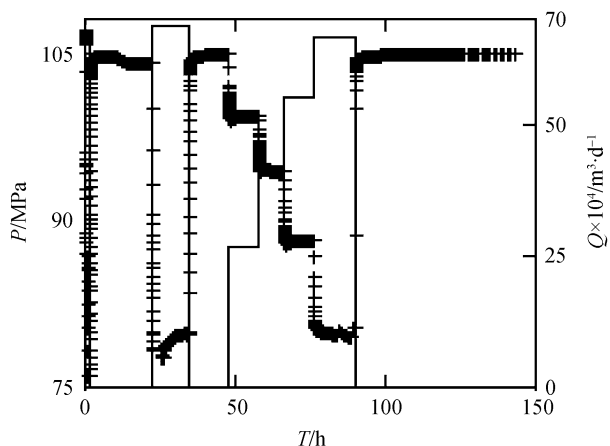


图9 某井测试压力、流量历史曲线图

半对数叠加检验图和测试全历史数据拟合图都要获得较好的拟合才能确定分析结果的正确性. 本研究所得到的分析拟合结果图如图10~12所示.

### 4.3 某井试井资料分析结果的评价

本研究的分析数据结果与常规分析结果的对比情况如表1所示. 从表中可以看出, 除了地层渗透率相差较大外, 差别最大的是表皮系数, 这和前面的理论分析是一致的. 根据现场分析的结果认为表皮为 63.46 是非常严重的地层污染状况, 而实际上该区域

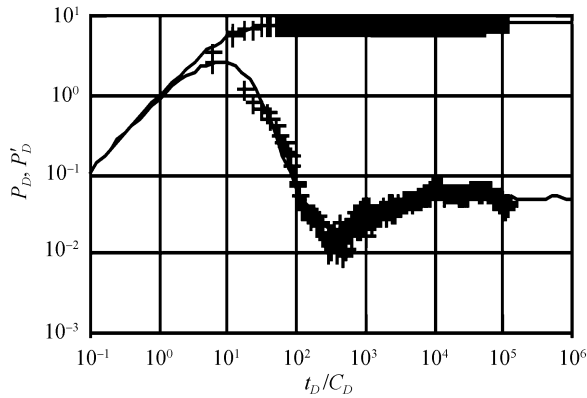


图 10 某井双对数曲线拟合图

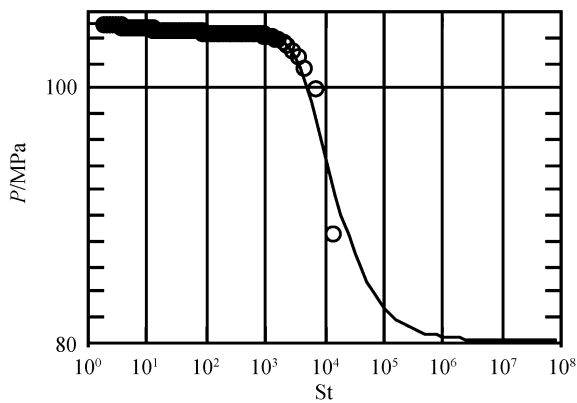


图 11 某井半对数叠加检验图

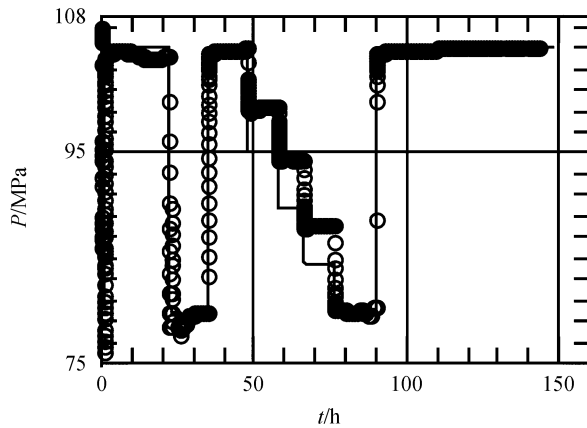


图 12 某井全压力历史曲线拟合图

的地层为裂缝性地层, 并无严重污染. 而是由于产层在 5000 m 以下, 因此只是存在一定的压力敏感特征. 实验室的岩芯实验对此做出了很好的证明.

另外, 本文分析还得到了一项重要参数, 即渗透率模量. 该模量的大小可以直接应用于油田的产能动态预测. 实际应用表明用该渗透率模量所预测的生产动态与实际生产的情况具有较好的一致性.

表 1 分析结果对比情况如表

参数名称	本文结果	常规分析结果
流动系数/ $\mu\text{m}^2 \cdot \text{m} \cdot \text{mPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$	0.7925	2.0972
地层系数/ $\mu\text{m}^2 \cdot \text{m}$	0.03065	
地层渗透率/ $\mu\text{m}^2$	$14.95 \times 10^{-3}$	$39.21 \times 10^{-3}$
储能系数	0.06	
窜流系数	$3 \times 10^{-4}$	
渗透率模量/MPa	0.01921	
井储系数/ $\text{m}^3 \cdot \text{MPa}^{-1}$	$8.291 \times 10^{-3}$	$1.597 \times 10^{-6}$
表皮系数	-1.485	63.46
地层压力/MPa	105.2	105.063

## 5 结论

(i) 根据目前实验结果和裂缝性压力敏感地层的特性, 建立了适合于不同外边界条件下裂缝性压力敏感地层的非常渗流模型.

(ii) 推导出了裂缝性压力敏感地层的非常渗流模型的有限元方程.

(iii) 在对区域进行非结构化网格自动划分的基础上, 利用有限元计算方法计算出了无限大地层、圆形有界地层以及线性组合边界地层的裂缝性压力敏感地层的井底压力的理论曲线, 并对理论曲线特征进行了分析和对比.

(iv) 确定了压力敏感系数以及有效井径组合参数  $C_D e^{2S}$  对理论曲线的影响, 得到了确定压力敏感油气藏的地层参数的方法.

(v) 通过对某气田高温高压深层气井的实例分析, 得到了较好的分析结果, 同时也验证本文所建立的裂缝性压力敏感地层的非常渗流模型的正确性.

## 参考文献

- 1 Thomas R D, Wardd D C. Effect of overburden pressure and water saturation on gas permeability of tight sandstone cores. J Pet Technol, 1972, 24(2): 120—124

- 2 Jones F O, Owens W W. A laboratory study of the low permeability gas sands. *J Pet Technol*, 1980, 32(9): 1631—1640
- 3 Kilmer N H, Morrow N R, Pitman J K. Pressure sensitivity of low permeability sandstones. *J Pet Sci Eng*, 1987, 1(1): 65—81
- 4 Vairogs J, Hearn C L, Darcing D W, et al. Effect of rock stress on gas production from low-permeability reservoirs. *J Pet Technol*, 1971, 23(9): 1161—1167
- 5 Terzaghi K. *Theoretical Soil Mechanics*. New York: Wiley, 1943
- 6 Biot M A. General theory of three-dimensional consolidation. *J App1 Phys*, 1941, 12(1): 155—164
- 7 Geertsma J. The effect of fluid pressure decline on volumetric changes of porous rocks. *Trans AIME*. 1957, 210(3): 403—524
- 8 Finol A, Farouq Ali S M. Numerical simulation of oil production with simultaneous ground subsidence. *Soc Pet Eng J*, 1975, 15(10): 411—424
- 9 张树宝, 译. 异常油田开发. 戈尔布诺夫 A T, 著. 北京: 石油工业出版社, 1987. 18—42
- 10 Raghavan R, Scorer D T, Miller F G. An investigation by numerical methods of the effect of pressure-dependent rock and fluid properties. *Soc Pet Eng J*, 1972, 12(6): 167—176
- 11 Samaniego V F, Brigham W E, Miller F G. An investigation of transient flow of reservoir fluids considering pressure-dependent rock and fluid properties. *Soc Pet Eng J*, 1977, 17(4): 140—149
- 12 Ostensen R W. Micro-crack permeability in tight gas sand-stone. *Soc Pet Eng J*, 1983, 23(12): 66—69
- 13 Pedrosa Jr O A. Pressure transient response in stress-sensitive formations. SPE 15115. The 1986 California Regional Meeting, Oakland, CA, USA, 2—4, April, 1986
- 14 Zhang M Y, Ambastha A K. New insights in pressure transient analysis for stress sensitive reservoir. SPE 28420, presented at the 69th Annual Technical Conference and Exhibition held in New Orleans, LA, USA, 25—28, Sept. 1994. 617—627
- 15 Yeung K. An approximate analytical study of aquifers with pressure-sensitive formation permeability. *Water Resour Res*, 1993, 29(10): 3495—3501
- 16 Wu Y S, Pruess K. Integral solutions for transient fluid flow through a porous medium with pressure-dependent permeability. *Int J Rock Mech Min Sci*, 2000, 37(1-2): 51—61
- 17 Davies J P, Davies D K. Stress-dependent permeability: Characterization and modeling. SPE 71750, *SPE J*, 2001, 36(6): 224—235
- 18 Osorio J G, Alcalde O R. A numerical model to study the formation damage by rock deformation from well test analysis. SPE 73742, The SPE International Symposium and Exhibition on Formation Damage Control, Lafayette, Louisiana, USA, 20—21, Feb., 2002
- 19 Samaniego V F, Villalobos L H. Transient pressure analysis of pressure-dependent naturally fractured reservoirs. *J Pet Sci Eng*, 2003, 39(1-2): 45—56
- 20 Gang H, Dusseault M B. Description of fluid flow around a wellbore with stress-dependent porosity and permeability. *J Pet Sci Eng*, 2003, 40(1-2): 1—16
- 21 Shunde Y, Dusseault M B, Rothenburg L. Analytical and numerical analysis of pressure drawdown in a poroelastic reservoir with complete overburden effect considered. *Adv Water Resour*, 2007, 30(5): 1160—1167
- 22 Zhou R, Liu Y W, Zhou F X. Numerical solutions for the transient flow in the homogeneous closed circle reservoirs. *Acta Mech Sinica*, 2003, 19(1): 40—45
- 23 葛家理. 油气层渗流力学. 北京: 石油工业出版社, 1982
- 24 同登科, 姜东梅, 陈钦雷. 变形双重介质油藏动态特征. *石油大学学报*, 2005, 25(5): 53—56
- 25 苏玉亮, 栾志安, 张永高. 变形介质油藏开发特征. *石油学报*, 2000, 21(2): 51—55
- 26 董平川. 变形介质流固耦合渗流的数值模型及其应用. *地质力学学报*, 2005, 11(3): 273—277
- 27 王延峰, 刘曰武, 贾振岐. 介质变形引起地层孔渗变化条件下的试井分析. *西安石油大学学报(自然科学版)*, 2004, 19(2): 17—20
- 28 Warren J E, Root P J. Behavior of naturally fractured reservoirs. *Soc Pet Eng J*, 1963, 3(9): 245—255