

# 低渗透应力敏感储层衰竭开发产量递减规律研究

陈民锋<sup>1,2</sup>, 秦立峰<sup>2</sup>, 荣金曦<sup>2</sup>, 王兆琪<sup>2</sup>

(1. 中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249; 2. 中国石油大学(北京)石油工程学院, 北京 102249)

**摘要:** 准确分析和预测应力敏感储层非稳态条件下的产量变化规律, 对高效开发此类油气藏具有重要作用。根据压力敏感储层基本特点, 建立相应的不稳定渗流数学模型; 在求解过程中采用不等距差分格式和显式处理渗透率的方法, 得到每个时间步的高阶差分线性方程组; 在证明差分方程组的数值稳定性和收敛性的基础上, 采用追赶法求解得到储层中压力分布。根据衰竭开发过程中生产井的产量完全来源于地层的弹性能这一特点, 利用地层压力分布求解生产井的产量。研究表明: 在不稳定渗流阶段, 不同应力敏感系数储层的压力分布差别较小, 应力敏感系数大的储层渗流阻力大, 产量小; 在边界控制流阶段, 无因次规整化产量与无因次时间变化关系呈现加速下降的趋势。QC 气藏实例分析表明, 考虑应力敏感条件的储层, 前期不稳定渗流阶段产量相对较大, 递减较快, 是重要的生产阶段, 所述方法可以简便准确地求解应力敏感条件下开发全过程的产量变化动态。

**关键词:** 应力敏感; 非稳态; 不等距差分; 压力分布; 产量递减

**中图分类号:** TE348 **文献标志码:** A

## Production decline law of low permeability stress-sensitive reservoir during depletion development

CHEN Minfeng<sup>1,2</sup>, QIN Lifeng<sup>2</sup>, RONG Jinxi<sup>2</sup>, WANG Zhaoqi<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China;

2. College of Petroleum Engineering in China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China)

**Abstract:** The production decline law of stress-sensitive reservoirs under unsteady conditions, which is accurately analyzed and predicted, plays an important role in the efficient development of such reservoirs. Based on the basic characteristics of the pressure-sensitive reservoir, the corresponding unstable seepage mathematical model is established. In the solution process, the unequal interval difference scheme and the method of explicitly dealing with the permeability are used to obtain the high-order difference linear equation system for each time step. Based on the numerical stability and convergence of the difference equations, the pressure distribution in the reservoir is solved by the method of catching up. According to the characteristic that the production of producing wells in the process of depletion development is completely derived from the elastic energy of the formation, the production of production wells is calculated by using the distribution of formation pressure. The research shows that in the stage of unstable seepage, the pressure distribution of reservoirs with different stress sensitivity coefficients has little difference, and the reservoirs with larger stress sensitivity coefficients have larger seepage resistance and lower production. In the stage of boundary control flow, the relationship between dimensionless normalized production and dimensionless time variation shows an accelerated downward trend. The case analysis of the QC gas reservoir shows that, considering the stress-sensitive condition of the reservoir, the production in the early unstable seepage stage is relatively large, and the decline is fast, which is an important production stage. The method presented in this paper can easily and accurately solve the production change dynamics in the whole development process under stress-sensitive conditions.

**Key words:** stress sensitivity; transient flow; non-isometric difference; pressure distribution; production decline

对于储层具有应力敏感效应的油气藏, 在衰竭开发的过程中, 应力敏感对油气藏开发的影响不可忽略。研究应力敏感储层非稳态产量问题对油气田合理开发具有重要意义。

目前针对应力敏感的研究多集中在实验测试

收稿日期: 2021-04-23; 改回日期: 2021-08-03。

第一作者简介: 陈民锋(1971—), 博士, 副教授, 主要从事油田开发系统理论方法和提高采收率技术研究工作。E-mail: cmfllp96@126.com。

和稳定渗流条件下的理论研究<sup>[1-5]</sup>。在建立数学模型定量描述应力敏感储层产量递减规律方面,解析方法采用较多的是Pedrosa变换线性化处理<sup>[6]</sup>,再结合摄动技术在拉氏空间解析求解。2001年段永刚和2009年孙来喜等<sup>[7-11]</sup>分别利用上述方法研究了应力敏感油藏在无限大地层中定压生产产量递减规律。在数值解方面,2014年田冷等<sup>[12]</sup>将压裂的页岩气藏简化为块状模型,考虑天然裂缝应力敏感现象,指出不稳定渗流阶段前期和边界控制流阶段应力敏感影响显著,2020年王伟等<sup>[13]</sup>基于页岩气的多尺度渗流机理,采用有限元方法求解压裂水平井模型,指出考虑应力敏感效应条件下的天然裂缝导流能力下降,引起产量递减率降低。然而他们并没有对应力敏感储层产量递减的原因进行解释,应力敏感储层与无应力敏感储层的压力分布的区别并不清楚<sup>[14-15]</sup>。

本文基于应力敏感储层不稳定渗流条件建立了数学模型,由于解析方法求得地层压力分布比较困难,本文采用数值方法进行求解。在求解过程中,采用不等距差分格式和显式处理渗透率的方法。文章证明了差分方程的稳定性和收敛性,在此基础上,绘制了应力敏感储层压力和渗透率的分布以及应力敏感储层产量递减曲线。

## 1 应力敏感储层数学模型的建立

在半径为 $r_e$ 、外边界封闭的圆形地层中间,一口井以恒定井底流压 $p_{wf}$ 进行生产(见图1);其他条件作如下假设:油气藏均匀、各向同性,上下为不渗透边界;孔隙中充满了单相微可压缩流体,流动符合达西定律;忽略重力的影响;不考虑表皮效应和井筒储存效应的影响。

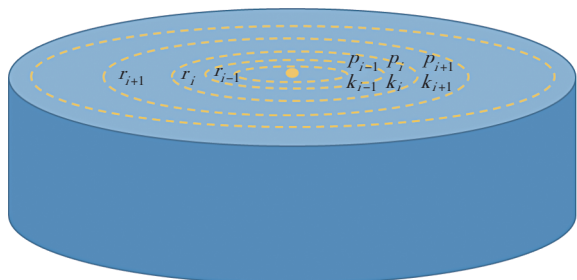


图1 圆形地层中一口井

### 1.1 储层参数变化数学描述

当储层存在应力敏感时,储层渗透率随压力的变化而变化,其关系式可表示为:

$$k = k_0 e^{-\alpha(p_e - p)} \quad (1)$$

式中, $\alpha$ 为介质应力敏感系数, $\text{MPa}^{-1}$ ;  $k$ 、 $k_0$ 为油气藏渗透率和初始渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$ ;  $p$ 、 $p_e$ 为油气藏压力和原始压力, $\text{MPa}$ 。

### 1.2 无因次时间的处理

在应力敏感储层中(见图1、图2),对于不同时刻第 $i$ 个空间单元无因次时间定义为:

$$t_{Di} = \frac{k_i}{\varphi \mu C_i} \frac{t}{r_w^2} \quad (2)$$

式中, $t_{Di}$ 为不同时刻第 $i$ 个空间单元无因次时间;  $k_i$ 为不同时刻第 $i$ 个空间单元渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$ ;  $\varphi$ 为孔隙度,%;  $\mu$ 为流体黏度, $\text{mPa}\cdot\text{s}$ ;  $C_i$ 为综合压缩系数, $\text{MPa}^{-1}$ 。

在无因次时间中渗透率和时间都是变量,为了消除渗透率对无因次时间的影响,重新定义为:

$$t_D = \frac{k_0}{\varphi \mu C_i} \frac{t}{r_w^2} \quad (3)$$

式中, $t_D$ 为不同时刻的无因次时间。

因此,对于不同时刻第 $i$ 个空间单元的无因次时间 $t_{Di}$ 可表示为:

$$t_{Di} = \frac{1}{\omega_i} t_D \quad (4)$$

式中, $\omega_i$ 为流度比。

$$\omega_i = \frac{k_0/\mu}{k_i/\mu} = \frac{k_0}{k_i} \quad (5)$$

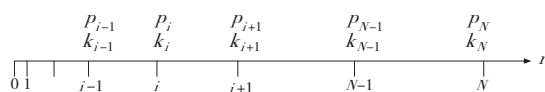


图2 在应力敏感储层中渗透率和压力的径向分布

### 1.3 无因次压力的处理

在应力敏感储层中,对于不同时刻第 $i$ 个空间单元无因次压力定义为:

$$p_{Di} = \frac{p_e - p}{p_e - p_{wf}} \quad (6)$$

式中, $p_{Di}$ 为不同时刻第 $i$ 个空间单元的无因次地层压力;  $p_{wf}$ 为生产井井底流压, $\text{m}^3/\text{d}$ 。

根据无因次压力的定义,对应无因次应力敏感系数为:

$$\alpha_D = (p_e - p_{wf})\alpha \quad (7)$$

### 1.4 应力敏感储层定压生产非稳态数学模型

具有应力敏感的储层在定压生产的过程中,对于不同时刻任意空间单元的无因次渗流方程如下:

$$\frac{\partial^2 p_{Di}}{\partial r_{Di}^2} + \frac{1}{r_{Di}} \frac{\partial p_{Di}}{\partial r_{Di}} - \omega_i \frac{\partial p_{Di}}{\partial t_D} = 0 \quad (8)$$

初始条件为:  $p_D(r_{Di}, 0) = 0$  (9)

特别地, 对于近井筒的第1个空间单元的内边界条件为:

$$p_{D1}(r_{D0}, t_D) = p_{D1}(1, t_D) = 1 \quad (10)$$

对于靠近封闭边界第  $N$  个空间单元的外边界条件为:

$$\left( \frac{\partial p_D}{\partial r_{DN}} \right)_{r_{DN} = r_{eD}} = 0 \quad (11)$$

式中,  $r_{Di}$  为第  $i$  个空间单元的无因次距离,  $r_{Di} = \frac{r_i}{r_w}$ ;  $r_{D0}$  为井壁处的无因次距离,  $r_{D0} = 1$ 。

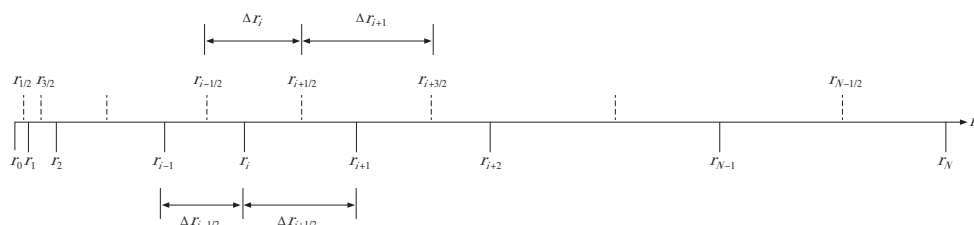


图3 不等距点中心网格

$$\Delta x = \frac{1}{N} \ln r_{eD}, r_i = e^{i\Delta x}, i = 0, 1, 2, \dots, N$$

$$\text{则 } \Delta r_{i+1/2} = r_i \Delta x, \Delta r_{i-1/2} = r_{i-1} \Delta x$$

$$\Delta r_i = (\Delta r_{i+1/2} + \Delta r_{i-1/2})/2$$

$$\left( \frac{\Delta r_i^2}{r_i \Delta r_{i+1/2}} + \frac{\Delta r_i}{\Delta r_{i+1/2}} \right) p_{i+1,D}^{n+1} - \left( \frac{\Delta r_i}{\Delta r_{i+1/2}} + \frac{\Delta r_i}{\Delta r_{i-1/2}} + \frac{\Delta r_i^2}{r_i \Delta r_{i+1/2}} + \omega_i \frac{\Delta r_i^2}{\Delta t_D} \right) p_{i,D}^{n+1} + \frac{\Delta r_i^2}{\Delta r_{i-1/2}} p_{i-1,D}^{n+1} = -\omega_i \frac{\Delta r_i^2}{\Delta t_D} p_{i,D}^n \quad (12)$$

任意时刻对于近井筒的第1个空间单元的差分方程为:

$$\left( \frac{\Delta r_1}{\Delta r_{3/2}} + \frac{\Delta r_1^2}{r_1 \Delta r_{3/2}} \right) p_{2,D}^{n+1} - \left( \frac{\Delta r_1}{\Delta r_{3/2}} + \frac{\Delta r_1}{\Delta r_{1/2}} + \frac{\Delta r_1^2}{r_1 \Delta r_{3/2}} + \omega_1 \frac{\Delta r_1^2}{\Delta t_D} \right) p_{1,D}^{n+1} = -\omega_1 \frac{\Delta r_1^2}{\Delta t_D} p_{1,D}^n - \frac{\Delta r_1}{\Delta r_{1/2}} \quad (13)$$

任意时刻对于靠近封闭边界第  $N$  个空间单元的差分方程为:

$$-\left( 2 \frac{\Delta r_N}{\Delta r_{N-1/2}} + \frac{\Delta r_N^2}{r_N \Delta r_{N-1/2}} + \omega_N \frac{\Delta r_N^2}{\Delta t_D} \right) p_{N,D}^{n+1} + \left( 2 \frac{\Delta r_N}{\Delta r_{N-1/2}} + \frac{\Delta r_N^2}{r_N \Delta r_{N-1/2}} \right) p_{N-1,D}^{n+1} = -\omega_N \frac{\Delta r_N^2}{\Delta t_D} p_{N,D}^n \quad (14)$$

由于应力敏感中的描述参数  $\omega_i$  为  $\Delta p_i$  的函数, 差分方程(10)、(11)、(12)构成非线性方程组。本文将参数  $\omega_i$  进行显式处理,  $\Delta p_i$  取  $n$  时刻的无因次压力值, 转化为线性方程组; 为了保证计算结果的稳定性, 采取了自适应变步长的处理方法进行逐步求解。

## 2.2 差分方程的稳定性、收敛性分析

将差分方程(12)、(13)、(14)显式处理后得到三对角方程组。

## 2 数学模型的求解及稳定性分析

### 2.1 数学模型的求解

将封闭边界油藏的整个开采过程处理成多个在很小时间单元内和很小空间单元的渗流问题来求解。在某个时间步长内, 每个空间单元体内渗透率是不变的, 其渗透率大小等于每个空间单元一侧的渗透率值。在不稳定生产的早期阶段, 近井地带压力降较大, 为了计算结果更加精确, 减小网格效应, 采用不等距网格划分, 在近井地带网格划分相对密集, 油气藏边界网格划分相对稀疏。本文采用点中心网格系统(见图3)。

$$\Delta r_{N+1/2} = \Delta r_{N-1/2} = r_{i-1} \Delta x, \Delta r_N = \Delta r_{N-1/2}$$

根据应力敏感储层无因次渗流方程, 经过离散后得到相应的差分方程, 则任意时刻第  $i$  个空间单元的差分方程为:

$$\begin{bmatrix} b_1 & c_1 & & & & \\ a_2 & b_2 & c_2 & & & \\ & \cdot & \cdot & \cdot & & \\ & & \cdot & \cdot & \cdot & \\ & & & \cdot & \cdot & \\ & & & & a_{n-1} & b_{n-1} & c_{n-1} \\ & & & & & a_n & b_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ p_{n-1} \\ p_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ d_{n-1} \\ d_n \end{bmatrix} \quad (15)$$

记作:  $\bar{A} \bar{P} = \bar{D}$

式中,  $\bar{A}$  为系数矩阵,  $\bar{P}$  为未知向量,  $\bar{D}$  为已知向量。

使用追赶法求解三对角矩阵  $A$  需要满足的充分条件:

$$(1) \quad |b_1| > |c_1| > 0$$

$$\text{在本文中, } b_i = -\left(\frac{\Delta r_i}{\Delta r_{i+1/2}} + \frac{\Delta r_i}{\Delta r_{i-1/2}} + \frac{\Delta r_i^2}{r_i \Delta r_{i+1/2}} + \omega_i \frac{\Delta r_i^2}{\Delta t_D}\right), a_i = \frac{\Delta r_i}{\Delta r_{i-1/2}}, c_i = \frac{\Delta r_i^2}{r_i \Delta r_{i+1/2}} + \frac{\Delta r_i}{\Delta r_{i+1/2}},$$

$$b_1 = -\left(\frac{\Delta r_1}{\Delta r_{1+1/2}} + \frac{\Delta r_1}{\Delta r_{1-1/2}} + \frac{\Delta r_1^2}{r_1 \Delta r_{1+1/2}} + \omega_1 \frac{\Delta r_1^2}{\Delta t_D}\right), c_1 = \left(\frac{\Delta r_1}{\Delta r_{3/2}} + \frac{\Delta r_1^2}{r_1 \Delta r_{3/2}}\right), b_n = -\left(2 \frac{\Delta r_N}{\Delta r_{N-1/2}} + \frac{\Delta r_N^2}{r_N \Delta r_{N-1/2}} + \omega_N \frac{\Delta r_N^2}{\Delta t_D}\right),$$

$$a_n = \left(2 \frac{\Delta r_N}{\Delta r_{N-1/2}} + \frac{\Delta r_N^2}{r_N \Delta r_{N-1/2}}\right), \text{有 } |b_i| > |a_i| + |c_i|,$$

$|b_1| > |c_1| > 0, |b_n| > |c_n| > 0$ , 说明使用追赶法求解是满足数值稳定性的要求。根据 Lax 定理, 只要证明了差分方程的稳定性, 则该差分方程一定是收敛的。

$$q = q_1 + q_2 + \cdots + q_i + \cdots + q_N, \quad i = 1, 2, \cdots, N,$$

$$q = -(\pi h \phi C_i) \left[ (r_1^2 - r_w^2) \frac{dp_1}{dt} + (r_2^2 - r_1^2) \frac{dp_2}{dt} + \cdots + (r_i^2 - r_{i-1}^2) \frac{dp_i}{dt} + \cdots + (r_N^2 - r_{N-1}^2) \frac{dp_N}{dt} \right], i = 1, 2, \cdots, N \quad (16)$$

式中,  $q_i$  为圆形封闭油藏第  $i$  个空间单元产量,  $\text{m}^3/\text{d}$ ;  $p_i$  为圆形封闭油藏第  $i$  个空间单元压力,  $\text{MPa}$ 。

$$(2) \quad |b_n| > |a_n| > 0$$

$$(3) \quad |b_i| \geq |a_i| + |c_i|, a_i c_i \neq 0, i = 2, 3, \cdots, n-1$$

则  $\bar{A} \bar{P} = \bar{D}$  的解存在唯一, 并且追赶法是数值稳定的。

### 3 产量求解

在衰竭式开发过程中, 生产井的产量完全来源于地层压力降落引起的流体和岩石弹性膨胀。将圆形封闭油藏离散为有限个空间单元后, 地层中心一口生产井的产量  $q(r)$  可以表示为:

根据圆形封闭油藏定压生产中产量、压力、时间、距离的无因次定义, 将公式(16)无因次化后, 有

$$q_D^k = \frac{1}{2} (r_{D1}^2 - 1) \frac{p_{D1}^k - p_{D1}^{k-1}}{t_D^k - t_D^{k-1}} + \frac{1}{2} (r_{D2}^2 - r_{D1}^2) \frac{p_{D2}^k - p_{D2}^{k-1}}{t_D^k - t_D^{k-1}} + \cdots + \frac{1}{2} (r_{Di}^2 - r_{Di-1}^2) \frac{p_{Di}^k - p_{Di-1}^{k-1}}{t_D^k - t_D^{k-1}} + \cdots + \frac{1}{2} (r_{DN}^2 - r_{DN-1}^2) \times \frac{p_{DN}^k - p_{DN}^{k-1}}{t_D^k - t_D^{k-1}}, i = 1, 2, \cdots, N; k = 1, 2, \cdots, \infty \quad (17)$$

$$\text{式中, } q_D \text{ 为生产井无因次产量, } q_D = \frac{q \mu B}{2 \pi k_0 (p_e - p_{wf})};$$

$p_{Di}$  为不同时刻第  $i$  个空间单元的无因次地层压力,

$$p_{Di} = \frac{p_e - p}{p_e - p_{wf}}; t_D \text{ 为无因次时间, } t_D = \frac{k_0}{\phi \mu C_i} \frac{t}{r_w^2}.$$

## 4 应力敏感储层生产规律

对于圆形封闭的油气藏( $r_D=1\ 000$ ), 由于模型中的应力敏感系数为无因次量, 为了清楚地表示应力敏感系数对产量递减的影响, 原始生产压差( $p_e - p_{wf}$ )取 10 MPa。

### 4.1 应力敏感储层中渗透率分布

储层初始渗透率相同, 定生产压差 10 MPa, 不同应力敏感系数储层的渗透率分布如图 4 所示。

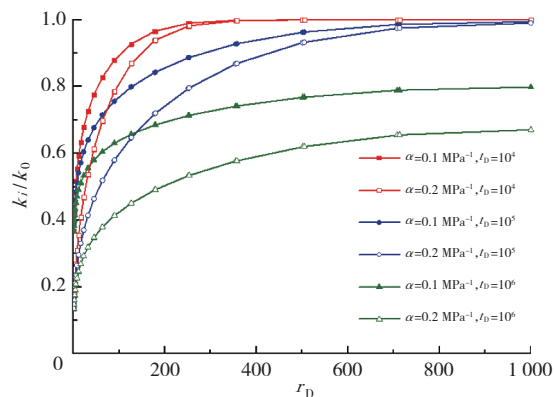


图4 应力敏感储层的渗透率分布

从图4可以看出:①应力敏感系数越大, 由于压力下降导致地层渗透率下降的幅度就越大, 地层渗透率/原始地层渗透率的值就越小;②生产时间越



长,整个地层消耗的能量就越多,平均压力下降幅度越大,导致地层渗透率进一步减小;③地层渗透率越小,渗流阻力越大(产量越低),压力波能够传播的范围就越小,传播的速度越慢。

#### 4.2 不同应力敏感下的压力分布及产量变化

在储层初始渗透率相同情况下,定生产压差 10 MPa,计算得到不同应力敏感系数储层中压力分布和产量变化,分别见图 5、图 6。

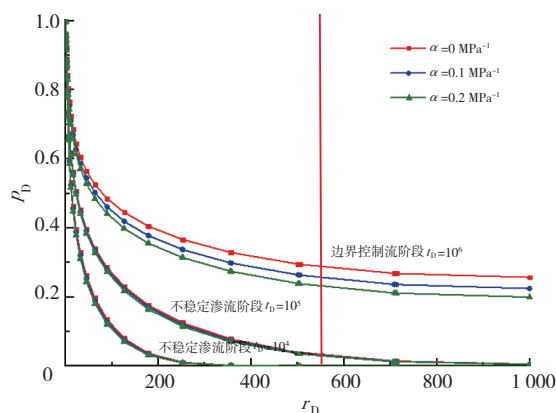


图 5 不同应力敏感储层压力分布规律

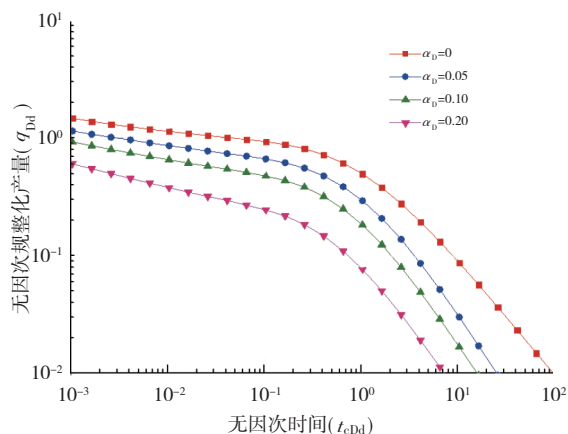


图 6 不同应力敏感储层产量变化规律

从图 5 可以看出:随着生产时间的延长,压力波传播范围增大,地层压力下降幅度就越大(地层能量消耗越多);应力敏感系数越大,压降范围内的储层渗透率越小,导致相应的产量越低;应力敏感系数越大的储层,渗流阻力越大,地层能量越容易消耗,压力波传播范围越小。

从图 6 可以看出,无因次产量递减变化可分为两个阶段,即不稳定渗流阶段和边界控制流阶段。在不稳定渗流早期,随着无因次时间的增加,无因次产量快速递减;应力敏感系数越大,无因次产量越小;在不稳定渗流后期,无因次产量始终处于较低水平。而在边界控制流阶段,无因次产量快速下

降,趋近于 0。可以认为,应力敏感储层的累积产量贡献主要来源于不稳定渗流阶段的产出,而在边界控制流阶段的累积产量占比可以忽略不计。

## 5 应用实例

QC 气藏基本参数:原始地层压力为 30 MPa,孔隙度为 10%,试井解释渗透率为  $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,流体黏度为 0.022 mPa·s,储层应力敏感系数在 0.05~0.10 MPa<sup>-1</sup> 之间,一口气井 A1 以定井底流压方式生产,基于建立的方法,可计算得到生产全过程气井生产动态变化和递减规律,如图 7 所示。

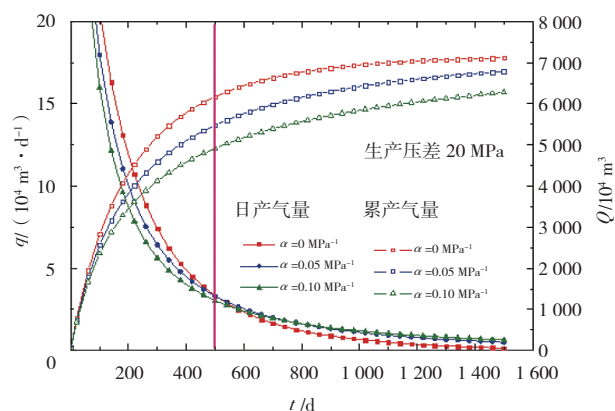


图 7 A1 井生产变化曲线

从图 7 可以看出:①当生产时间小于某一时间(对应边界流控制阶段前),递减较快,当继续开井生产,产量递减趋势则逐渐变缓;边界流控制阶段前的累积产量占整个累积产量的 70% 以上,是重要的生产阶段。②在相同情况下,储层应力敏感系数越小,生产井的初始产气量越大,产量递减就越慢,最终累积产气量越大。③在相同的地层压力和生产压差条件下,应力敏感系数越小,产量越大,相应的开采速度越快,地层消耗的能量就越多,导致在不稳定渗流阶段后加速递减至低产量水平。④在整个开发阶段,相对于不考虑应力敏感效应,累积产气量平均降低约 8.45%;储层应力敏感系数越小,开发全过程中的累积产量与压力下降幅度的比值就越大,能量利用率越高。应用本文建立的方法,可以简便快速地计算特低渗透油气藏在储层应力敏感条件下的开发全过程产量变化动态。

## 6 主要认识

(1)对于应力敏感储层,在不稳定渗流阶段,地层压力分布差别较小;在边界控制流阶段,应力敏感系数越大,压力波传播范围就越小,整体地层压

力下降幅度越大。

(2)应力敏感对油气井产量的影响与应力敏感系数有关;在不稳定渗流阶段,应力敏感系数越大,生产井产量越小;在边界控制流阶段,应力敏感储层呈双曲递减,无因次规整化产量与无因次时间的变化关系均呈现加速下降的趋势。

(3)不稳定渗流阶段的产量变化受应力敏感的影响较大,而该阶段的累积产量占开发全过程累积产量的70%以上,是重要的生产阶段,在制定生产制度时要避免过大的生产压差产生的不利影响。

#### 参考文献:

- [1] 李传亮. 渗透率的应力敏感效应分析方法[J]. 新疆石油地质, 2006, 27(3): 348-350.
- [2] 郭平, 张俊, 杜建芬, 等. 采用两种实验方法进行气藏岩心应力敏感研究[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2007, 29(2): 7-9.
- [3] 郭小哲, 周长沙. 考虑应力敏感的页岩气藏压裂水平井渗流模型建立与分析[J]. 长江大学学报(自然科学版), 2015, 12(5): 44-50.
- [4] 张波, 段志强, 薛媛, 等. 致密气藏气井递减方法研究[J]. 石油化工应用, 2020, 39(11): 44-47, 55.
- [5] 刘会会, 崔越华, 吴优, 等. 基于分段拟合的致密气藏递减分析方法[J]. 石油化工应用, 2020, 39(3): 20-24.
- [6] OZKEN E, RAGHAVAN R. New solutions for well-test analysis problems: part2 - computational considerations and applications [J]. SPE Formation Evaluation, 1991, 6(3): 369-378.
- [7] 徐梦雅, 廖新维, 刘姣姣. 储层应力敏感性对致密气藏压裂水平井试井分析的影响[J]. 陕西科技大学学报, 2012, 30(5): 57-61.
- [8] 牛丽娟. 压力敏感性对低渗透油藏弹性产能影响[J]. 科学技术与工程, 2014, 14(3): 137-140.
- [9] 段永刚, 黄诚, 陈伟, 等. 应力敏感裂缝性油藏不稳态压力动态分析[J]. 西南石油学院学报, 2001, 23(5): 19-22.
- [10] 孙来喜, 李成勇, 李成, 等. 低渗透气藏应力敏感与气井产量分析[J]. 天然气工业, 2009, 29(4): 74-76.
- [11] 孙贺东. 油气井现代产量递减分析方法及应用[M]. 北京: 石油工业出版社, 2013.
- [12] 田冷, 肖聪, 顾岱鸿. 考虑应力敏感与非达西效应的页岩气产能模型[J]. 天然气工业, 2014, 34(12): 70-75.
- [13] 王伟, 李阳, 陈祖华, 等. 基于复杂渗流机理的页岩气藏压后数值模拟研究[J]. 油气藏评价与开发, 2020, 10(1): 22-29.
- [14] 游良容, 张建国, 袁继明, 等. 低渗透气田产量递减评价方法研究[J]. 重庆科技学院学报(自然科学版), 2017, 19(2): 29-32.
- [15] 杨金辉, 李立, 李钟洋, 等. 滑脱和应力敏感效应对页岩气开发动态影响的数值模拟研究[J]. 石油钻探技术, 2017, 45(1): 83-90.

(编辑 谢 葵)