

文章编号: 1000 0747(2006) 05 0634 04

# 酸化压裂井停泵压力三维分析模型和解释方法

任勇<sup>1,2</sup>, 郭建春<sup>1</sup>, 赵金洲<sup>1</sup>, 叶登胜<sup>2</sup>

(1. 西南石油大学“油气藏地质及开发工程”国家重点实验室; 2. 中国石油四川石油管理局井下作业公司)

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研项目(20040615003); 四川省杰出青年学科带头人培养基金(05ZQ026 27)

**摘要:** 为了对酸化压裂井压后裂缝参数进行准确的分析和解释, 以模拟停泵前后裂缝内的物理、化学变化过程为思路, 以停泵后缝内的物质平衡方程为主线, 建立酸化压裂井停泵后的缝内压力递减模型, 并提出了针对酸化压裂井裂缝参数解释、评估的“曲线拟合法”。该模型考虑了地层温度和流体(残酸和 CO<sub>2</sub>) 压缩性的影响, 能有效模拟停泵后的压力降落, 进而解释出酸蚀裂缝几何尺寸、闭合压力、酸液滤失系数及液体效率等参数, 从而为酸化压裂施工评价和优化酸化压裂设计提供直接可靠的技术手段。图 2 表 1 参 5

**关键词:** 酸化压裂; 压力递减; 解释方法; 数学模型

中图分类号: TE357.2 文献标识码: A

## A 3 D analytical model and interpretation method of pressure decline for acid fracturing well

REN Yong<sup>1,2</sup>, GUO Jian chun<sup>1</sup>, ZHAO Jin zhou<sup>1</sup>, YE Deng sheng<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Sichuan 610500, China; 2. Downhole Service Company, CNPC Sichuan Petroleum, Sichuan 610051, China)

**Abstract:** With the rapid development of hydraulic fracturing, more and more attention has been paid to the techniques of fracture diagnosing and evaluating after fracturing. There are still few studies about fracture diagnosing and evaluating for acid fracturing well. The pressure decline analysis method for acid fracturing well is a kind of "curve fitting" method whose main idea is simulating the physical and chemical changes before and after pump off, and whose main line is the material balance equation. The models consider the influence of temperature and the compressibility of fluids (residual acid and CO<sub>2</sub>). They can effectively simulate the pressure decline after pump off, in turn, interpret the acid fracture geometry, closure pressure, acid loss coefficient, etc, and provide dependable techniques for evaluating acid fracturing as well as optimizing the reservoir stimulation.

**Key words:** acid fracturing; pressure decline; interpretation technique; mathematical model

## 0 引言

目前酸化压裂技术在理论、设备、工艺等方面都取得了长足的进展, 但对酸化压裂后缝长、缝宽、酸液滤失系数等参数的解释与评估还缺乏直接和可靠的技术。相对比较成熟的水力压裂井压后压力递减分析和评估技术<sup>[1,2]</sup>, 酸化压裂井在这方面发展相当缓慢。

自从 Nolte<sup>[3]</sup> 首次给出了用压裂停泵后的压降曲线求解裂缝几何形态参数和压裂滤失系数的二维模型和解释方法后, 压裂井的压后压力递减分析模型已从二维模型逐渐发展到拟三维, 甚至全三维模型, 国内的相关研究还针对性地发展了裂缝性油藏、中高渗透性油藏的压裂井压力递减分析技术。但是, 基于 Nolte 理论所提出的 G 函数压降分析法并不适用于酸化压裂井, 原因在于: 酸化压裂井施工停泵后, 酸岩反应还在继续, 产生的 CO<sub>2</sub> 对酸液和残酸的压缩性、停泵后的压

力动态都会有显著的影响; 酸岩反应热会使酸液和残酸的温度升高, 进而影响停泵后的压力动态; 酸液的滤失机理与压裂液区别很大, 其滤失系数的计算方法也有别于压裂液的滤失系数计算方法。国外文献指出, 酸化压裂井压力递减分析中解释出的滤失系数要比采用非反应液体的小型压裂施工压力递减分析中得出的大得多<sup>[4]</sup>。

本文以模拟停泵前后缝内的物理、化学变化过程为思路, 以停泵后缝内物质平衡方程为主线, 考虑流体(残酸和 CO<sub>2</sub>) 压缩性和地层温度的影响, 建立酸化压裂井停泵后的缝内压力递减模型及利用酸化压裂井压力递减资料计算裂缝参数的数学模型(模型中忽略了天然裂缝的影响)。利用研制的软件, 进行实例分析, 解释出裂缝几何尺寸、闭合压力、滤失系数以及液体效率等参数, 说明了本文解释模型、解释技术以及软件的可靠性和实用性, 对酸化压裂井压后压力递减分析技

术的发展及应用有较强的理论和现实意义。

## 1 停泵后缝内压力递减模型的建立

### 1.1 缝内流体物质平衡方程

停泵后,假设酸液继续滤失、残酸仍然刻蚀裂缝,建立缝内流体的物质平衡方程如下:

$$Qt - \sum_{i=1}^m u_i - \sum_{i=1}^m u_{i,shut} + V_g = V_f + V_s \quad (1)$$

### 1.2 停泵前后酸液滤失量的计算

在整个施工时间( $t$ )内,裂缝口处微元酸液的滤失量为:

$$u_i = 2 \sum_{i=1}^n (h_i^i \Delta L \sqrt{\Delta t} C_i^i) \quad (2)$$

缝尖处微元的滤失量为:

$$u_m = 2 h_m^n \Delta L \sqrt{\Delta t} C_m^n \quad (3)$$

同理,在整个停泵测试时间  $t_{shut}$  内,裂缝口处微元酸液的滤失量为:

$$u_{i,shut} = 2 \sum_{i=1}^N (h_i^n \Delta L \sqrt{\Delta t_{shut}} C_i^i,shut) \quad (4)$$

停泵后缝尖处微元的滤失量为:

$$u_{m,shut} = 2 \sum_{i=1}^N (h_m^n \Delta L \sqrt{\Delta t_{shut}} C_m^i,shut) \quad (5)$$

显然,通过计算各裂缝微元的酸液滤失量,并将各部分迭加即可得到停泵前后酸液总的滤失量。

### 1.3 停泵前后 CO<sub>2</sub> 体积的计算

在计算停泵前后的 CO<sub>2</sub> 体积之前,做如下假设:①酸岩反应生成的 CaCl<sub>2</sub>、MgCl<sub>2</sub> 在地层条件下完全溶解于残液中;②生成的 CO<sub>2</sub> 部分溶于残液中,溶解量受裂缝微元的温度、压力等条件影响;③裂缝尺寸的实时变化影响缝内自由 CO<sub>2</sub> 的体积分数  $f_g$ , 以及缝内流体的物理参数(如密度、比热容以及热传导系数等);④每个微元处的 CO<sub>2</sub> 体积由该微元处的酸液刻蚀量、温度以及压力等确定,不受邻近微元的影响。

注入裂缝内的酸液量为:

$$M_{in} = \rho_{HCL} C_{HCL} (Qt_{HCL} - 2 \sum_{i=1}^m u_i - 2 \sum_{i=1}^m u_{i,shut}) \quad (6)$$

停泵前酸液消耗量为:

$$M_{consume} = M_{in} - 2 \sum_{i,j,k} [V_f(i,j,k) \rho_{shut,HCL}(i,j,k) \times C_{shut,HCL}(i,j,k)] \quad (7)$$

由酸岩反应方程式和真实气体状态方程可以得出停泵前每个裂缝微元产生的 CO<sub>2</sub> 体积:

$$V(i,j,k) = ZRT_{in,consume}(i,j,k)/p(i,j) \quad (8)$$

根据 Pruthon<sup>[5]</sup> 的实验结果可以求出停泵前所产生的游离态 CO<sub>2</sub> 的体积:

$$V_{g1} = \sum_{i,j,k=1}^m \{V(i,j,k)[1 - S(i,j,k)]\} \quad (9)$$

同理,停泵后产生的游离态 CO<sub>2</sub> 的体积为:

$$V_{g2} = \sum_{i,j,k=1}^m \{V_{shut}(i,j,k)[1 - S(i,j,k)]\} \quad (10)$$

### 1.4 停泵后压力递减方程

停泵后,假设裂缝不再延伸,考虑裂缝中流体(残酸、CO<sub>2</sub>)的压缩性和热膨胀性,根据垂直裂缝中可压缩流体的质量守恒定律推导停泵后的压力递减方程。

根据缝内流体的连续性方程可以得出气、液的状态方程分别为:

$$-\frac{2C}{\sqrt{t_{shut}}} = \frac{\pi}{4} \frac{1-v}{G} h \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\pi}{4} \frac{1-v}{G} h \Delta p \times \left[ \frac{1}{p} \frac{\partial p}{\partial t} - \frac{1}{T} \frac{\partial T}{\partial t} \right] \quad (11)$$

$$-\frac{2C}{\sqrt{t_{shut}}} = \frac{\pi}{4} \frac{1-v}{G} h \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\pi}{4} \frac{1-v}{G} h \Delta p \times \left[ \alpha \frac{\partial p}{\partial t} - \beta \frac{\partial T}{\partial t} \right] \quad (12)$$

根据流体中自由 CO<sub>2</sub> 的体积分数  $f_g$ , 整理得压力递减方程为:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = B_1 \frac{\partial T}{\partial t} - B_2 \frac{1}{\sqrt{t_{shut}}} \quad (13)$$

其中:

$$B_1 = \frac{A_2 \Delta p}{A_3 \Delta p + 1} \quad B_2 = \frac{2Ch}{A_1(A_3 \Delta p + 1)}$$

$$A_1 = \frac{\pi}{4} \frac{(1-v)h^2}{G} \quad A_2 = (1-f_g)\beta + \frac{f_g}{T}$$

$$A_3 = (1-f_g)\alpha + \frac{f_g}{p}$$

为了应用现场停泵后压力实测点数据,用有限差分方法将(13)式离散化:

$$p^{\lambda+1} - p^\lambda = B_1(T^{\lambda+1} - T^\lambda) - B_2 \frac{\Delta t}{\sqrt{(\lambda+1)\Delta t}} \quad (\lambda = 0, 1, 2, \dots, N) \quad (14)$$

## 2 三维裂缝参数解释方法

### 2.1 曲线自动拟合方法的提出

利用数值分析中的函数逼近理论分析酸化压裂井停泵后的压力数据。设实测压力数据记为  $p_{test}(i)$  ( $i$  表示时步,即测试点序号,  $i=1, 2, \dots, N$ )。通过编制酸化压裂井停泵后压力递减分析软件,可以得出在不同的

裂缝参数和地层参数组合下的拟合曲线  $\eta$  条, 压力数据记为  $p_{simu}(i, j)$  ( $i$  表示时步,  $i=1, 2, \dots, N$ ;  $j$  表示不同的拟合曲线,  $j=1, 2, \dots, \eta$ )。

根据设定参数, 计算机自动求解一系列在不同裂缝几何尺寸以及相关参数下获取的拟合曲线, 并将实测压降数据与所有拟合曲线的误差平方和进行对比, 误差函数  $ERR(j)$  值最小的即是最佳的拟合曲线:

$$\text{Min}\{ERR(j)\} = \text{Min}_{j=1, 2, \dots, \eta} \sum_{i=1}^N [p_{test}(i) - p_{simu}(i, j)]^2 \quad (15)$$

### 2.2 三维裂缝参数及其他参数解释模型

#### 2.2.1 裂缝几何尺寸

根据上述曲线拟合的思想, 可以得出误差函数  $ERR(j)$  值最小时的缝长  $L_{final}$ 。

对于灰岩和白云岩, 停泵后由于酸岩反应继续进行而增加的裂缝宽度分别为:

$$dw(i) = \frac{100V_f(i, j, k) \rho_{shut, HCL}(i, j, k) \Delta C_{shut, HCL}(i, j, k)}{2.71 \times 73 \int_{L_{final}(i-1)}^{L_{final}(i)} h(x) dx} \quad (16)$$

$$dw(i) = \frac{184V_f(i, j, k) \rho_{shut, HCL}(i, j, k) \Delta C_{shut, HCL}(i, j, k)}{2.87 \times 146 \int_{L_{final}(i-1)}^{L_{final}(i)} h(x) dx} \quad (17)$$

#### 2.2.2 酸液的滤失系数

本文将裂缝划分成微元, 对每个微元分别求解, 并考虑不同微元处酸液滤失系数随时间的变化, 因此能得到酸液滤失系数随裂缝位置和时间的变化规律。

$$C_{wh}(x) = \frac{C_{v, wh}^2(x)}{2} \left[ \sqrt{\frac{1}{C_c^2(x)} + \frac{4}{C_{v, wh}^2(x)}} - \frac{1}{C_c(x)} \right] \quad (18)$$

#### 2.2.3 闭合压力

$$p_c = \frac{\left( \frac{v}{1-v} \right) S_v + S_{hi} + \frac{A_{pe} p_i}{2}}{1 - A_{pe} / 2} \quad (19)$$

本文通过经验公式得到闭合压力值的大小, 进而在给定的精度条件下对其进行拟合, 消除了可能产生的人为误差, 从而获得较准确的闭合压力值。

## 3 实例分析

根据本文建立的压降解释模型和提出的裂缝参数解释技术, 编制了酸化压裂井停泵后压力递减分析解释软件, 并应用此软件进行实例分析。表 1 是某油田 2 口井基础数据。

后的压力降落。以 X658 井为例, 竖线前的实测压力降落为 3.72MPa, 拟合出的压降 3.70MPa; 竖线后的实测压力降落为 2.77MPa, 拟合出的压降 2.52MPa。T12 井压降模拟结果与实测曲线吻合也较好。

表 1 实例井基础数据

参数	X658 井	T12 井
酸化压裂井段 (m)	5610~5670	4695.5~4777.5
前置液量 (m <sup>3</sup> )	290	155
酸量 (m <sup>3</sup> )	280	190
施工排量 (m <sup>3</sup> /min)	5.5~6.0	5.5~6.2
岩石弹性模量 (MPa)	35 000	35 000
泊松比	0.25	0.25
产层温度 (K)	125	118
残酸压缩系数 (MPa <sup>-1</sup> )	0.000 267	0.000 263
酸液热传导系数 (W/(m <sup>2</sup> ·K))	0.033 9	0.035 6

注: CO<sub>2</sub> 热传导系数为 0.0021W/(m<sup>2</sup>·K), 酸液比热容为 4.186kJ/(kg·K), CO<sub>2</sub> 比热容为 6.279 kJ/(kg·K), 岩石比热容为 1.047 kJ/(kg·K)

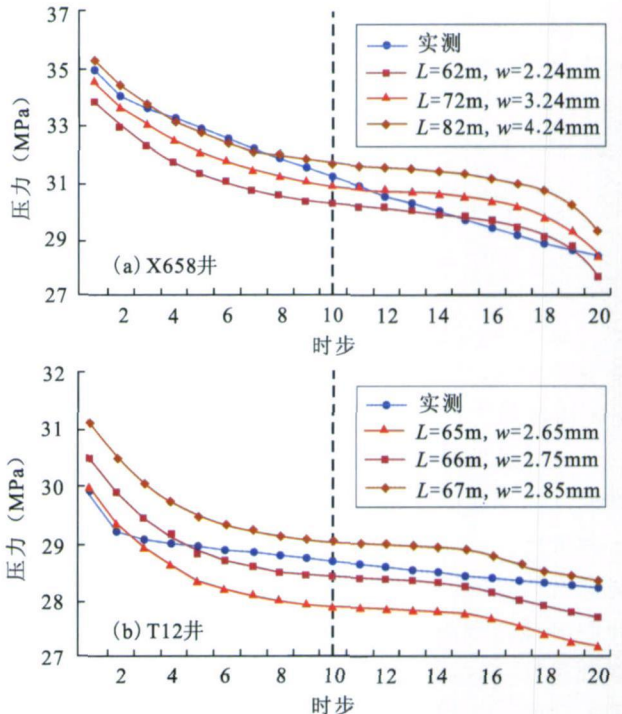


图 1 不同缝宽、缝长条件下 X658 井和 T12 井压力拟合图

由图 2 可知, CO<sub>2</sub> 对 X658 井和 T12 井停泵后的压力有明显的影 响。若忽略 CO<sub>2</sub> 的影响, X658 井解释压力的误差绝对值最大可达 0.98MPa, 最小 0.19MPa, T12 井误差绝对值最大也有 0.51MPa, 最小 0.02MPa。因此在酸化压裂井压力递减过程中 CO<sub>2</sub> 的影响不可忽略。忽略 CO<sub>2</sub> 影响时解释出的压降曲线下降幅度要大得多, 下降的斜率也大。这是由于酸岩反应生成的大部分 CO<sub>2</sub> 溶解在残酸中, 只有很小部分呈气态, 施工结束后缝内压力逐渐下降, 溶解的 CO<sub>2</sub> 析出, 释放其能量, 反映到井口即是压力递减要缓慢得多。由图 2 还

可看出,在开始停泵后的几分钟之内,不考虑 $\text{CO}_2$ 影响时解释的曲线压力下降要快的多,说明刚开始停泵时 $\text{CO}_2$ 气体对压力的影响最大。

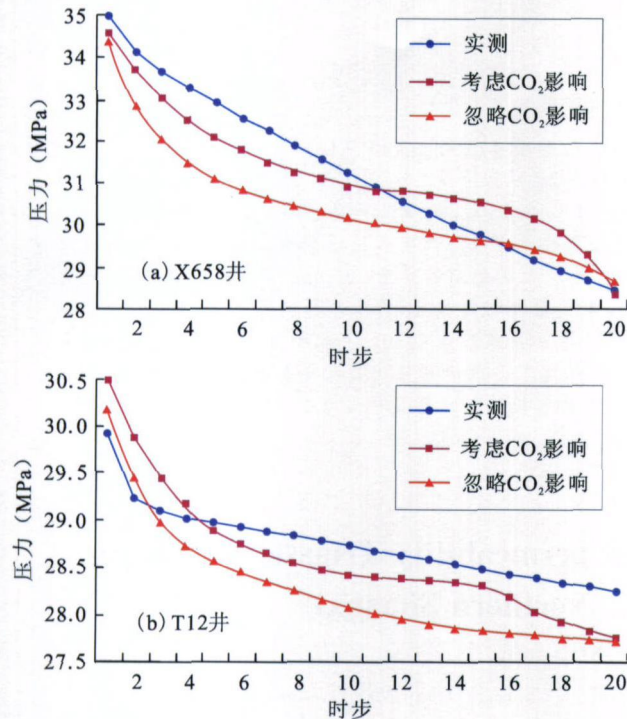


图2  $\text{CO}_2$ 对X658井和T12井停泵后压力递减的影响图

## 4 结论

本文提出了分析酸化压裂井压后压力递减的“曲线拟合”法。此方法全面模拟了停泵前后缝内的物理、化学变化过程,在模型的建立和关井后流体连续性方程的推导过程中,考虑了流体的压缩性和温度的影响,更逼近地下裂缝的实际情况,更符合酸化压裂井的压降解释,而且形式简明,应用方便。

针对酸化压裂井的特点,充分考虑并计算了酸岩反应产生的 $\text{CO}_2$ 气体对缝内流体的流变性质、压后压力动态的影响,结果表明,在酸化压裂井压后压力的递减分析中,不能忽略 $\text{CO}_2$ 气体的影响。

实例分析表明,本文建立的模型和解释技术能有效的用于现场酸化压裂井压后裂缝评估及施工评价。

符号注释:

$Q$ ——地面注入排量,  $\text{m}^3/\text{min}$ ;  $u$ ——裂缝微元段滤失量,  $\text{m}^3$ ;  $u_{\text{shut}}$ ——停泵后裂缝微元段滤失量,  $\text{m}^3$ ;  $V_g$ ——停泵前后产生总的气态 $\text{CO}_2$ 体积,  $\text{m}^3$ ;  $V_{g1}$ ——停泵前所生成的游离态 $\text{CO}_2$ 的体积,  $\text{m}^3$ ;  $V_{g2}$ ——停泵后所生成的游离态 $\text{CO}_2$ 的体积,  $\text{m}^3$ ;  $V_f$ ——停泵时刻裂缝总体积,  $\text{m}^3$ ;  $V_c$ ——停泵后由于酸岩反应继续进行而增加的裂缝体积,  $\text{m}^3$ ;  $t$ ——注液时间,  $\text{min}$ ;  $\Delta t$ ——时间步长,  $\text{min}$ ;  $t_{\text{HCl}}$ ——施工总计注酸时间,  $\text{min}$ ;  $t_{\text{shut}}$ ——停泵时间,  $\text{min}$ ;  $\Delta t_{\text{shut}}$ ——停泵后的时间步长,  $\text{min}$ ;  $L$ ——裂缝长度,  $\text{m}$ ;  $w$ ——裂缝宽度,  $\text{mm}$ ;  $\Delta l$ ——裂缝微元长度,  $\text{m}$ ;  $h$ ——裂缝高

度,  $\text{m}$ ;  $h_1^1$ ——缝口处微元在第一个 $\Delta t$ 段内的缝高,  $\text{m}$ ;  $h_1^n$ ——缝口处微元在停泵时刻的缝高,  $\text{m}$ ;  $h_m^n$ ——缝尖处微元在停泵时刻的缝高,  $\text{m}$ ;  $C$ ——滤失系数,  $10^{-4} \text{m}/\text{min}^{0.5}$ ;  $C_1^1$ ——缝口处微元在第一个 $\Delta t$ 段内的综合滤失系数,  $10^{-4} \text{m}/\text{min}^{0.5}$ ;  $C_m^n$ ——缝尖处微元在停泵时刻的综合滤失系数,  $10^{-4} \text{m}/\text{min}^{0.5}$ ;  $N$ ——停泵后测试时间步;  $C_{1,\text{shut}}^1$ ——缝口处微元在第一个 $\Delta t_{\text{shut}}$ 时间段内的综合滤失系数,  $10^{-4} \text{m}/\text{min}^{0.5}$ ;  $n$ ——停泵前的步;  $m$ ——裂缝微元数;  $C_{\text{wh}}$ ——考虑酸蚀蚓孔效应的综合滤失系数,  $10^{-4} \text{m}/\text{min}^{0.5}$ ;  $C_c$ ——受地层流体压缩性控制的滤失系数,  $10^{-4} \text{m}/\text{min}^{0.5}$ ;  $C_{\text{w,wh}}$ ——考虑了蚓孔效应的受滤液黏度控制的滤失系数,  $10^{-4} \text{m}/\text{min}^{0.5}$ ;  $M_{\text{in}}$ ——进入到裂缝中的酸液总质量,  $\text{kg}$ ;  $M_{\text{consume}}$ ——停泵前裂缝中消耗的酸液总质量,  $\text{kg}$ ;  $\rho_{\text{HCl}}$ ——注入酸的密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $\rho_{\text{shut,HCl}}(i, j, k)$ ——停泵时刻不同微元处残酸的密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $c_{\text{HCl}}$ ——注入酸的浓度,  $\text{f}$ ;  $c_{\text{shut,HCl}}(i, j, k)$ ——停泵时刻不同微元处残酸的浓度,  $\text{f}$ ;  $\Delta c_{\text{shut,HCl}}(i, j, k)$ ——停泵后每个微元由于酸岩反应减少的酸液浓度,  $\text{f}$ ;  $V_i(i, j, k)$ ——不同微元处的裂缝体积,  $\text{m}^3$ ;  $V(i, j, k)$ ——停泵前每个微元所产生的 $\text{CO}_2$ 的体积,  $\text{m}^3$ ;  $V_{\text{shut}}(i, j, k)$ ——停泵后每个微元所产生的 $\text{CO}_2$ 的体积,  $\text{m}^3$ ;  $n_{\text{consume}}$ ——停泵前裂缝中消耗的酸液量,  $\text{mol}$ ;  $Z$ ——偏差因子, 无因次;  $R$ ——通用气体常数,  $8.3144 \text{kJ}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ ;  $T_i$ ——停泵前第 $i$ 个微元处的温度,  $\text{K}$ ;  $p$ ——裂缝中的压力,  $\text{MPa}$ ;  $p(i, j)$ ——停泵前每个微元处的压力(此处忽略了沿缝宽方向的压力变化),  $\text{MPa}$ ;  $\Delta p$ ——裂缝中的净压力,  $\text{MPa}$ ;  $p_c$ ——闭合压力,  $\text{MPa}$ ;  $S(i, j, k)$ ——不同裂缝微元处的 $\text{CO}_2$ 溶解度,  $\text{m}^3/\text{m}^3$ ;  $\nu$ ——岩石泊松比, 无因次;  $G$ ——弹性模量,  $\text{MPa}$ ;  $T$ ——温度,  $\text{K}$ ;  $\alpha$ ——流体等温压缩率, 无因次;  $\beta$ ——流体体积膨胀率, 无因次;  $S_V$ ——上覆层应力,  $\text{Pa}$ ;  $S_{\text{hi}}$ ——在无上覆层和孔隙压力条件下的初始水平应力,  $\text{Pa}$ ;  $A_{\text{pe}}$ ——孔隙弹性常数, 无因次;  $p_i$ ——地层内孔隙压力,  $\text{Pa}$ 。

参考文献:

- [1] 李勇明, 郭建春, 赵金洲. 裂缝性油藏压裂井产能数值模拟模型研究与应用[J]. 石油勘探与开发, 2005, 32(2): 126-128. (LI Yongming, GUO Jianchun, ZHAO Jinzhou. Numerical simulation of fracturing naturally fractured reservoirs [J]. Petroleum Exploration and Development, 2005, 32(2): 126-128.)
- [2] 杨丙秀, 蒋廷学, 丁云宏, 等. 低孔低渗储集层探井低伤害压裂技术研究与应用[J]. 石油勘探与开发, 2005, 32(2): 119-122. (YANG Bingxiu, JIANG Tingxue, DING Yunhong, et al. Low damage fracturing technology for exploration wells in low porosity and permeability reservoirs [J]. Petroleum Exploration and Development, 2005, 32(2): 119-122.)
- [3] Nolte K G. Determination of fracture parameters from fracture pressure declines [A]. SPE 8341, 1979. 23-26.
- [4] Van Domelen M S. Optimizing fracture acidizing treatment design by integrating tire testing, field testing, and computer simulation [A]. SPE 22393, 1992. 24-27.
- [5] Pruthon C F, Savage R L. The solubility of carbon dioxide in calcium chloride water solution at 75, 000 and 120 and high pressure [J]. Journal of American Chemical Society, 1945, 67: 1550-1554.

第一作者简介:任勇(1980),男,四川南充人,硕士,中国石油四川石油管理局井下作业公司新疆分公司助理工程师,从事油气田增产技术的现场服务和室内研究工作。地址:新疆库尔勒市塔指一区47栋202室,四川石油管理局井下作业公司新疆分公司,邮政编码:841000;电话:(0996)2174113。E-mail: swpiry@163.com

收稿日期:2005-07-22 修回日期:2006-02-03

(编辑 郭海莉 梁大新 绘图 梁大新)