



# (12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 110210157 A

(43)申请公布日 2019.09.06

(21)申请号 201910498213.4

(22)申请日 2019.06.10

(71)申请人 西南石油大学

地址 610500 四川省成都市新都区新都大道8号

(72)发明人 李勇明 吴磊 张烈辉

(74)专利代理机构 成都金英专利代理事务所  
(普通合伙) 51218

代理人 袁英

(51) Int. Cl.

G06F 17/50(2006.01)

E21B 43/26(2006.01)

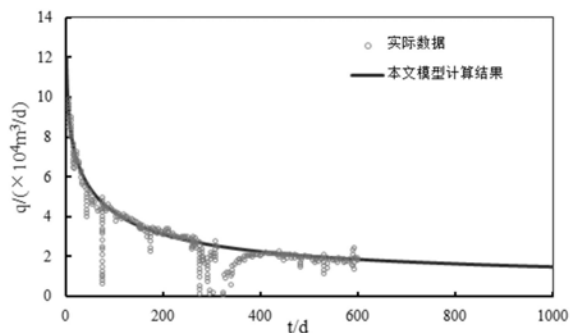
权利要求书4页 说明书9页 附图1页

## (54)发明名称

一种页岩气藏压裂水平井非稳态扩散下产能计算方法

## (57)摘要

本发明公开了一种页岩气藏压裂水平井非稳态扩散下产能计算方法,包括:(1)收集压裂改造所形成的水力裂缝参数,计算页岩气藏弹性储容比、非稳态扩散窜流系数、无因次渗透率模量、页岩气吸附解吸系数和水力裂缝有限导流能力;(2)在直角坐标系中确定水力裂缝位置,离散水力裂缝并确定各裂缝微元的坐标,根据点源函数理论和压降叠加原理,求取每条水力裂缝缝尖处的压力;(3)根据等效面积原则建立水力裂缝渗流模型,得到每条水力裂缝在水平井筒处的压力;(4)计算在非稳态扩散下的页岩气藏压裂水平井的产能。本发明原理可靠,操作简便,能够在给定页岩储层参数和水力裂缝参数的前提下,准确预测非稳态扩散方式下页岩气藏压裂水平井的产能。



1. 一种页岩气藏压裂水平井非稳态扩散下产能计算方法,依次包括以下步骤:

(1) 收集压裂改造所形成的水力裂缝参数,包括水力裂缝间距、缝长、方位角以及裂缝条数,计算页岩气藏弹性储容比 $\omega$ 、非稳态扩散窜流系数 $\lambda$ 、无因次渗透率模量 $\gamma_D$ 、页岩气吸附解吸系数 $\sigma$ 和水力裂缝有限导流能力 $C_{FD}$ ;

(2) 在直角坐标系中确定水力裂缝位置,离散水力裂缝并确定各裂缝微元的坐标,根据点源函数理论和压降叠加原理,求取每条水力裂缝缝尖处的压力;

(3) 根据等效面积原则建立水力裂缝渗流模型,得到每条水力裂缝在水平井筒处的压力;

(4) 计算在非稳态扩散下的页岩气藏压裂水平井的产能。

2. 如权利要求1所述的一种页岩气藏压裂水平井非稳态扩散下产能计算方法,其特征在于,所述步骤(2)过程如下:根据水力裂缝参数,在平面直角坐标系中绘制出水力裂缝的位置分布情况,把每条水力裂缝分割成若干微元,确定离散后每个水力裂缝微元及每条水力裂缝缝尖的坐标位置:

水力裂缝微元中心坐标

$$\begin{cases} \bar{x}_{i,j} = -\frac{2N-2j+1}{2N}x_{fi} \sin \alpha_i \\ \bar{y}_{i,j} = y_i + \frac{2N-2j+1}{2N}x_{fi} \cos \alpha_i \end{cases} \quad 1 \leq j \leq N$$

$$\begin{cases} \bar{x}_{i,j} = \frac{2(j-N)-1}{2N}x_{fi} \sin \alpha_i \\ \bar{y}_{i,j} = y_i - \frac{2(j-N)-1}{2N}x_{fi} \cos \alpha_i \end{cases} \quad N+1 \leq j \leq 2N$$

水力裂缝微元节点坐标

$$\begin{cases} x_{i,j} = -\frac{N-j+1}{N}x_{fi} \sin \alpha_i \\ y_{i,j} = y_i + \frac{N-j+1}{N}x_{fi} \cos \alpha_i \end{cases} \quad 1 \leq j \leq N$$

$$\begin{cases} x_{i,j} = \frac{j-N-1}{N}x_{fi} \sin \alpha_i \\ y_{i,j} = y_i + \frac{j-N-1}{N}x_{fi} \cos \alpha_i \end{cases} \quad N+1 \leq j \leq 2N$$

水力裂缝缝尖的坐标为水力裂缝两翼末端微元的节点坐标,即 $j=1$ 或 $2N$ ;

式中 $\bar{x}_{i,j}$ ——第 $i$ 条水力裂缝的第 $j$ 个微元的中心横坐标,m;

$\bar{y}_{i,j}$ ——第 $i$ 条水力裂缝的第 $j$ 个微元的中心纵坐标,m;

$x_{i,j}$ ——第 $i$ 条水力裂缝的第 $j$ 个微元的节点横坐标,m;

$y_{i,j}$ ——第 $i$ 条水力裂缝的第 $j$ 个微元的节点纵坐标,m;

$y_i$ ——第 $i$ 条水力裂缝与水平井筒相交时的纵坐标,m;

$x_{fli}$ ——第 $i$ 条水力裂缝的左翼裂缝长度,m;

$x_{fri}$ ——第*i*条水力裂缝的右翼裂缝长度, *m*;

$N$ ——水力裂缝单翼离散微元数;

$\alpha_i$ ——第*i*条水力裂缝与*y*轴的夹角, 度;

然后根据点源函数理论和压降叠加原理, 通过拉氏变换得到第*m*条水力裂缝缝尖处的压力计算公式:

$$\bar{\xi}_{fmD} = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^{2N} \frac{\bar{q}_{fiD} L_{ref}}{x_{fi} + x_{fii}} \int_{x_{Dij}}^{x_{Di,j+1}} K_0 \left[ \sqrt{f(s)} R_D(x_D, y_D, x_{wDi}) \right] \sqrt{1 + \text{ctg}^2(\alpha_i)} dx_{wDi}$$

$$f(s) = \omega s + 3\lambda\sigma(1-\omega) \left[ \sqrt{s/\lambda} \coth(\sqrt{s/\lambda}) - 1 \right]$$

$$R_D = \sqrt{(-x_{fImD} \sin \alpha_m - x_{wDi})^2 + (y_{mD} + x_{fImD} \cos \alpha_m - y_{iD} + \text{ctg}(\alpha_i) x_{wDi})^2}$$

$$\text{式中 } x_{fImD} = \frac{x_{f1m}}{L_{ref}}; \quad x_D = \frac{x}{L_{ref}}; \quad y_D = \frac{y}{L_{ref}}; \quad x_{wD} = \frac{x_w}{L_{ref}}; \quad y_{wD} = \frac{y_w}{L_{ref}}; \quad y_{iD} = \frac{y_i}{L_{ref}};$$

$$y_{mD} = \frac{y_m}{L_{ref}}; \quad x_{Dij} = \frac{x_{ij}}{L_{ref}}; \quad x_{Di,j+1} = \frac{x_{i,j+1}}{L_{ref}};$$

$x, y$ ——地层中某一点的横、纵坐标, *m*;

$x_{i,j}, x_{i,j+1}$ ——第*i*条水力裂缝上第*j*个裂缝微元节点的横坐标, *m*;

$y_i$ ——第*i*条水力裂缝与*y*轴的交点坐标值, *m*;

$y_m$ ——第*m*条水力裂缝与*y*轴的交点坐标值, *m*;

$x_w, y_w$ ——水力裂缝微元的中心横、纵坐标, *m*;

$x_{wDi}$ ——积分变量, 无因次;

$x_{f1m}$ ——第*m*条水力裂缝左翼裂缝长度, *m*;

$R_D$ ——某一裂缝微元中心到地层某一点的距离, 无因次;

$\bar{q}_{fiD}$ ——第*i*条裂缝的无因次流量; 无因次;

$s$ ——拉普拉斯变量, 无因次;

$\alpha_m$ ——第*m*条水力裂缝与*y*轴的夹角, °;

$M$ ——页岩气藏水平井压裂产生水力裂缝的条数;

$K_0$ ——零阶第二类修正Bessel函数;

$L_{ref}$ ——参考长度, 选取水平井筒半径, *m*。

3. 如权利要求1所述的一种页岩气藏压裂水平井非稳态扩散下产能计算方法, 其特征在于, 所述步骤(3)过程如下:

首先根据等效面积原则建立水力裂缝渗流模型, 得到气体在水力裂缝中作平面径向流时的渗流公式:

$$p_{fm} - p_w = \frac{q_{fm} \mu}{2\pi k_F w_F} \ln \left( \frac{\sqrt{(x_{fIm} + x_{fIm}) h / \pi}}{r_w} \right)$$

式中  $r_e$ ——等效为平面径向流后的供给半径, *m*;

$r_w$ ——水平井筒半径, *m*;

$x_{f1m}$ ——第*m*条水力裂缝的左翼缝长度, *m*;

$x_{fm}$ ——第m条水力裂缝的右翼缝长度,m;  
 $p_{fm}$ ——第m条水力裂缝缝尖处的压力,Pa;  
 $p_w$ ——水平井筒处压力,Pa;  
 $q_{fm}$ ——第m条水力裂缝的流量; $m^3/s$ ;  
 $h$ ——页岩气藏的厚度,m;  
 $\mu$ ——气体黏度, $Pa \cdot s$ ;  
 $k_F$ ——水力裂缝渗透率, $m^2$ ;  
 $w_F$ ——水力裂缝宽度,m;

考虑水力裂缝的有限导流能力,得到拉氏空间下的水力裂缝渗流模型,得到第m条水力裂缝在水平井筒处的压力计算公式:

$$\bar{\xi}_{wmD} = \bar{\xi}_{fmD} + \frac{\bar{q}_{fmD}}{C_{FD}} \ln \left( \frac{\sqrt{(x_{fmD} + x_{flmD})h/\pi}}{r_{wD}} \right)$$

$$\text{式中 } x_{fmD} = \frac{x_{fm}}{L_{ref}}; \quad r_{wD} = \frac{r_w}{L_{ref}}$$

$x_{fm}$ ——第m条水力裂缝右翼裂缝长度,m;  
 $\bar{\xi}_{fmD}$ ——无因次形式的第m条水力裂缝尖产生的压力;  
 $\bar{\xi}_{wmD}$ ——无因次形式的第m条水力裂缝在水平井筒处的压力;  
 $\bar{q}_{fmD}$ ——第m条水力裂缝的无因次流量;

再将第m条水力裂缝缝尖处的压力计算式代入,得到第m条水力裂缝在水平井筒处的压力计算式:

$$\bar{\xi}_{wmD} = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^{2N} \frac{\bar{q}_{fiD} L_{ref}}{x_{fi} + x_{fj}} \int_{x_{Dij}}^{x_{Dij+1}} K_0 \left[ \sqrt{f(s)} R_D(x_D, y_D, x_{wDi}) \right] \sqrt{1 + \text{ctg}^2(\alpha_i)} dx_{wDi} + \frac{\bar{q}_{fmD}}{C_{FD}} \ln \left( \frac{\sqrt{(x_{fmD} + x_{flmD})h/\pi}}{r_{wD}} \right)$$

$$f(s) = \omega s + 3\lambda\sigma(1-\omega) \left[ \sqrt{s/\lambda} \coth(\sqrt{s/\lambda}) - 1 \right].$$

4. 如权利要求1所述的一种页岩气藏压裂水平井非稳态扩散下产能计算方法,其特征在于,所述步骤(4)包括以下内容:

1) 假设水平井筒中的渗流不存在阻力,第m条水力裂缝在水平井筒处的压力 $\bar{\xi}_{wmD}$ 等于井底压力 $\bar{\xi}_{wD}$ ,水力裂缝在水平井筒处的压力计算式中含有第m条水力裂缝的无因次流量 $\bar{q}_{fmD}$ 和井底压力 $\bar{\xi}_{wD}$ ,结合流量约束条件,令 $m = 1, 2, 3, \dots, M$ ,得到包含 $\bar{q}_{f1D}, \bar{q}_{f2D}, \bar{q}_{f3D}, \dots, \bar{q}_{fMD}, \bar{\xi}_{wD}$ 的M+1个方程组合而成的方程组,求得页岩气井定流量生产时的井底压力 $\bar{\xi}_{wD}$ ;

2) 根据拉氏空间下页岩气井定流量生产时的井底压力 $\bar{\xi}_{wD}$ 与气井流量 $\bar{q}_D$ 之间的转换关

系,得到拉氏空间下页岩气井无因次流量 $\bar{q}_D$ ,从而得到真实空间下的页岩气井流量 $q$ ,即页岩气藏压裂水平井在非稳态扩散下的产能。

5.如权利要求4所述的一种页岩气藏压裂水平井非稳态扩散下产能计算方法,其特征在于,所述结合流量约束条件为:

$$\sum_{i=1}^M \bar{q}_{fID} = \frac{1}{S};$$

根据页岩气井定流量生产时的井底压力 $\bar{\xi}_{wD}$ ,通过下式得到拉氏空间下页岩气井无因次流量 $\bar{q}_D$ :

$$\bar{q}_D = \frac{1}{S^2 \bar{\varphi}_{wHD}}$$

$$\bar{\varphi}_{wHD} = -\frac{1}{\gamma_D} \ln[1 - \gamma_D \bar{\xi}_{wD}]$$

通过数值反演得到真实空间下的页岩气井无因次流量 $q_D$ ,再通过下式计算页岩气井流量 $q$ ,即页岩气藏压裂水平井在非稳态扩散下的产能:

$$q = q_D \times q_{sc}$$

式中 $q_{sc}$ ——页岩气井初始产量, $m^3/s$ 。

## 一种页岩气藏压裂水平井非稳态扩散下产能计算方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及油气田开发领域页岩气藏压裂水平井的产能计算方法,特别是涉及一种非稳态扩散方式下页岩气藏压裂水平井的产能计算方法。

### 背景技术

[0002] 随着我国能源需求矛盾日益增强,页岩气作为非常规油气资源的有效补充,备受关注,也成为我国天然气增储上产的关键一环。页岩气在储层中赋存方式多样,运移机理复杂,通常包括吸附解吸、扩散、渗流等多重运移机制,而常规的渗流理论也不适合于页岩气藏,正确且清楚地认识页岩气藏的渗流规律及正确表征页岩气运移机制对指导页岩气藏开发具有重要的意义。基质中的页岩气通过扩散的方式运移到天然裂缝系统,扩散的方式分为拟稳态和非稳态扩散,而实际气藏的开发过程中几乎不会存在拟稳态的扩散方式,气体从基质向天然裂缝运移更符合非稳态扩散方式。由于页岩的低孔、超低渗等特征,水平井分段多簇压裂方法成为了常用的增产措施,而压裂后页岩气藏水平井产能的准确预测是评估压裂改造有效性及页岩气藏是否成功开发的关键,通常建立页岩气藏产能模型的方法有解析法、数值模拟法和半解析法,数值模拟法主要采用计算机程序来近似求解,初期所需气藏参数多,求解迭代时间长,对硬件要求高等特点限制应用;解析法对实际情况进行简化,通过高度抽象、理想化物理模型,利用各种数学方法对模型进行直接求解,产能预测的可靠性主要取决于物理模型的精确程度,且限制条件比较多;半解析法是在解析法的基础之上,从页岩气藏的基本渗流机理出发,建立准确的数学模型,并且通过点源函数理论得到点源解,然后考虑压裂形成的复杂裂缝形态,通过离散水力裂缝建立准确的产能模型,思路简洁直观,操作性强,且能够获得准确的预测结果。

[0003] 综上所述,目前需要的页岩气藏压裂水平井产能预测方法应该具有以下特点:(1)对产量进行动态预测前期所需参数少,计算结果准确;(2)考虑页岩气藏的复杂渗流机理,在非稳态扩散方式下,对早期产量进行准确预测。

### 发明内容

[0004] 本发明的目的在于提供一种页岩气藏压裂水平井非稳态扩散下产能计算方法,该方法原理可靠,操作简便,能够在给定页岩储层参数和水力裂缝参数的前提下,准确预测非稳态扩散方式下页岩气藏压裂水平井的产能。

[0005] 为达到以上技术目的,本发明采用以下技术方案。

[0006] 将页岩气藏看作是双重介质系统,主要包括页岩基质系统和天然裂缝系统,而页岩气在储层中的渗流又分为两个阶段,第一阶段为气体在页岩储层中解吸后通过非稳态扩散的方式运移到天然裂缝系统,第二阶段为天然裂缝中气体进入水力裂缝,通过水力裂缝流入井筒直至产出地面的过程。

[0007] 一种页岩气藏压裂水平井非稳态扩散下产能计算方法,依次包括以下步骤:

[0008] (1) 收集压裂改造所形成的水力裂缝参数,包括水力裂缝间距、缝长、方位角以及

裂缝条数,计算页岩气藏弹性储容比 $\omega$ 、非稳态扩散窜流系数 $\lambda$ 、无因次渗透率模量 $\gamma_D$ 、页岩气吸附解吸系数 $\sigma$ 和水力裂缝有限导流能力 $C_{FD}$ ;

[0009] (2) 结合收集的水力裂缝参数,在直角坐标系中确定水力裂缝位置,离散水力裂缝并确定各裂缝微元的坐标,然后根据点源函数理论和压降叠加原理,求取每条水力裂缝缝尖处的压力;

[0010] (3) 根据等效面积原则建立水力裂缝渗流模型,得到每条水力裂缝在水平井筒处的压力;

[0011] (4) 计算在非稳态扩散下的页岩气藏压裂水平井的产能。

[0012] 所述步骤(1)中计算的参数包括页岩气藏弹性储容比 $\omega$ 、非稳态扩散窜流系数 $\lambda$ 、无因次渗透率模量 $\gamma_D$ 、页岩气吸附解吸系数 $\sigma$ 和水力裂缝有限导流能力 $C_{FD}$ ,过程如下:

[0013] 1) 页岩储层发育基质孔隙和天然裂缝,是页岩气在储层中的主要储存空间,为了描述基质和天然裂缝弹性储容能力的大小,定义页岩气藏的弹性储容比 $\omega$ ,通过下式计算(李晓平.地下油气渗流力学[M].北京:石油工业出版社,2007:153):

$$[0014] \quad \omega = \frac{\phi\mu_i C_{gi}}{\Lambda} \quad (1)$$

$$[0015] \quad \text{式中 } \Lambda = \phi\mu_i C_{gi} + \frac{2\pi k_i h}{q_{sc}};$$

[0016]  $k_i$ ——天然裂缝系统的初始渗透率, $m^2$ ;

[0017]  $\mu_i$ ——气体初始黏度, $Pa \cdot s$ ;

[0018]  $\phi$ ——天然裂缝系统孔隙度,无因次;

[0019]  $C_{gi}$ ——气体初始压缩系数, $Pa^{-1}$ ;

[0020]  $h$ ——页岩气藏的厚度, $m$ ;

[0021]  $q_{sc}$ ——页岩气井初始产量, $m^3/s$ 。

[0022] 2) 页岩基质系统的气体通过拟稳态扩散的方式向天然裂缝系统运移,定义扩散窜流系数 $\lambda$ 表征此阶段运移特征,通过下式计算(李晓平.地下油气渗流力学[M].北京:石油工业出版社,2007:154):

$$[0023] \quad \lambda = \frac{\Lambda L_{ref}^2}{k_i \tau} \quad (2)$$

$$[0024] \quad \text{式中 } \tau = \frac{R^2}{D};$$

[0025]  $L_{ref}$ ——参考长度,本发明中选取水平井筒半径, $m$ ;

[0026]  $D$ ——扩散系数, $m^2/s$ ;

[0027]  $R$ ——页岩基质球块的半径, $m$ 。

[0028] 3) 页岩气藏发育大量的天然裂缝,在储层压力降低时,会发生应力敏感效应,因此定义无因次渗透率模量 $\gamma_D$ 来表征应力敏感现象,通过下式计算(Liu M, Xiao C, Wang Y, et al. Sensitivity analysis of geometry for mutli-stage fractured horizontal wells with consideration of finite-conductivity fractures in shale gas reservoirs[J]. Journal of Natural Gas Science&Engineering, 2015, 22: 182-195):

$$[0029] \quad \gamma_D = \alpha \frac{p_{sc} q_{sc} T}{\pi k_i h T_{sc}} \quad (3)$$

$$[0030] \quad \text{式中 } \alpha = \frac{\mu Z}{2p} \gamma$$

[0031] Z——气体偏差因子,无因次;

[0032]  $\mu$ ——气体黏度,Pa·s;

[0033] T——页岩储层的温度,K;

[0034]  $p_{sc}$ ——标准状况下压力(我国石油行业规定取值为0.101325MPa),Pa;

[0035]  $T_{sc}$ ——标准状况下温度(我国石油行业规定标准状况温度为293K),K;

[0036]  $\gamma$ ——应力敏感系数,Pa<sup>-1</sup>;

[0037] p——天然裂缝系统的压力,Pa。

[0038] 4) 页岩气藏基质孔隙表面吸附有大量的吸附气,吸附气解吸后对页岩气藏的运移有很大影响,因此引入吸附解吸系数 $\sigma$ 表征页岩气藏吸附能力的大小,计算如下:

$$[0039] \quad \sigma = \frac{p_{sc} q_{sc} T}{\pi k_i h T_{sc}} \frac{V_L \varphi(p_L)}{[\varphi(p_L) + \varphi(p_i)]^2} \quad (4)$$

$$[0040] \quad \varphi(p_L) = \int_0^{p_L} \frac{2p}{\mu Z} dp \quad (5)$$

$$[0041] \quad \varphi(p_i) = \int_0^{p_i} \frac{2p}{\mu Z} dp \quad (6)$$

[0042] 式中 $\varphi(p_L)$ ——Langmuir拟压力,Pa/s;

[0043]  $\varphi(p_i)$ ——页岩气藏初始拟压力,Pa/s;

[0044]  $p_L$ ——页岩气的Langmuir压力,Pa;

[0045]  $V_L$ ——页岩气的Langmuir体积,sm<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>;

[0046]  $p_i$ ——页岩气藏初始压力,Pa。

[0047] 公式(4)~(6)中的Langmuir压力 $p_L$ 和Langmuir体积 $V_L$ 都是表征页岩气吸附解吸特性的参数(Langmuir I.The adsorption of gases on plane surfaces of glass,mica and platinum[J].Journal of Chemical Physics,2015,40(12):1361-1403),而Langmuir拟压力是利用拟压力定义把 $p_L$ 转换为拟压力形式。

[0048] 5) 经过水力压裂形成的水力裂缝具有有限的导流能力,水力裂缝导流能力 $C_{FD}$ 通过下式计算:

$$[0049] \quad C_{FD} = \frac{k_F w_F}{k_i h} \quad (7)$$

[0050] 式中 $k_F$ ——水力裂缝渗透率,m<sup>2</sup>;

[0051]  $w_F$ ——水力裂缝宽度,m;

[0052]  $C_{FD}$ ——水力裂缝导流能力,无因次。

[0053] 所述步骤(2)过程如下:根据水力裂缝参数,在平面直角坐标系中绘制出水力裂缝的位置分布情况,把每条水力裂缝分割成若干微元,确定离散后每个水力裂缝微元及每条



水力裂缝缝尖的坐标位置:

[0054] 水力裂缝微元中心坐标

$$[0055] \begin{cases} \bar{x}_{i,j} = -\frac{2N-2j+1}{2N} x_{fi} \sin \alpha_i \\ \bar{y}_{i,j} = y_i + \frac{2N-2j+1}{2N} x_{fi} \cos \alpha_i \end{cases} \quad 1 \leq j \leq N \quad (8)$$

$$[0056] \begin{cases} \bar{x}_{i,j} = \frac{2(j-N)-1}{2N} x_{fi} \sin \alpha_i \\ \bar{y}_{i,j} = y_i - \frac{2(j-N)-1}{2N} x_{fi} \cos \alpha_i \end{cases} \quad N+1 \leq j \leq 2N \quad (9)$$

[0057] 水力裂缝微元节点坐标

$$[0058] \begin{cases} x_{i,j} = -\frac{N-j+1}{N} x_{fi} \sin \alpha_i \\ y_{i,j} = y_i + \frac{N-j+1}{N} x_{fi} \cos \alpha_i \end{cases} \quad 1 \leq j \leq N \quad (10)$$

$$[0059] \begin{cases} x_{i,j} = \frac{j-N-1}{N} x_{fi} \sin \alpha_i \\ y_{i,j} = y_i + \frac{j-N-1}{N} x_{fi} \cos \alpha_i \end{cases} \quad N+1 \leq j \leq 2N \quad (11)$$

[0060] 水力裂缝缝尖的坐标为水力裂缝两翼末端微元的节点坐标,即 $j=1$ 或 $2N$ 。

[0061] 式中 $\bar{x}_{i,j}$ ——第 $i$ 条水力裂缝的第 $j$ 个微元的中心横坐标, $m$ ;

[0062]  $\bar{y}_{i,j}$ ——第 $i$ 条水力裂缝的第 $j$ 个微元的中心纵坐标, $m$ ;

[0063]  $x_{i,j}$ ——第 $i$ 条水力裂缝的第 $j$ 个微元的节点横坐标, $m$ ;

[0064]  $y_{i,j}$ ——第 $i$ 条水力裂缝的第 $j$ 个微元的节点纵坐标, $m$ ;

[0065]  $y_i$ ——第 $i$ 条水力裂缝与水平井筒相交时的纵坐标, $m$ ;

[0066]  $x_{fli}$ ——第 $i$ 条水力裂缝的左翼裂缝长度, $m$ ;

[0067]  $x_{fri}$ ——第 $i$ 条水力裂缝的右翼裂缝长度, $m$ ;

[0068]  $N$ ——水力裂缝单翼离散微元数;

[0069]  $\alpha_i$ ——第 $i$ 条水力裂缝与 $y$ 轴的夹角,度。

[0070] 然后根据点源函数理论和压降叠加原理,通过拉氏变换得到第 $m$ 条水力裂缝缝尖处的压力计算公式(孔祥言.高等渗流力学[M].合肥:中国科学技术大学出版社,1999:171-172;张建国,杜殿发,侯健,等.油气层渗流力学[M].东营:中国石油大学出版社,2009:79-84):

[0071]

$$\bar{\xi}_{fmD} = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^{2N} \frac{\bar{q}_{fiD} L_{ref}}{x_{fi} + x_{fi}} \int_{x_{Dij}}^{x_{Dij+1}} K_0 \left[ \sqrt{f(s)} R_D(x_D, y_D, x_{wDi}) \right] \sqrt{1 + \text{ctg}^2(\alpha_i)} dx_{wDi} \quad (12)$$

$$[0072] \quad f(s) = \omega s + 3\lambda\sigma(1-\omega) \left[ \sqrt{s/\lambda} \coth\left(\sqrt{s/\lambda}\right) - 1 \right] \quad (13)$$

$$[0073] \quad R_D = \sqrt{(-x_{f1mD} \sin \alpha_m - x_{wDi})^2 + (y_{mD} + x_{f1mD} \cos \alpha_m - y_{iD} + \text{ctg}(\alpha_i) x_{wDi})^2} \quad (14)$$

$$[0074] \quad \text{式中 } x_{f1mD} = \frac{x_{f1m}}{L_{\text{ref}}}; \quad x_D = \frac{x}{L_{\text{ref}}}; \quad y_D = \frac{y}{L_{\text{ref}}}; \quad x_{wD} = \frac{x_w}{L_{\text{ref}}}; \quad y_{wD} = \frac{y_w}{L_{\text{ref}}}; \quad y_{iD} = \frac{y_i}{L_{\text{ref}}};$$

$$[0075] \quad y_{mD} = \frac{y_m}{L_{\text{ref}}}; \quad x_{Di,j} = \frac{x_{i,j}}{L_{\text{ref}}}; \quad x_{Di,j+1} = \frac{x_{i,j+1}}{L_{\text{ref}}};$$

[0076]  $x, y$ ——地层中某一点的横、纵坐标, m;

[0077]  $x_{i,j}, x_{i,j+1}$ ——第  $i$  条水力裂缝上第  $j$  个裂缝微元节点的横坐标, m;

[0078]  $y_i$ ——第  $i$  条水力裂缝与  $y$  轴的交点坐标值, m;

[0079]  $y_m$ ——第  $m$  条水力裂缝与  $y$  轴的交点坐标值, m;

[0080]  $x_w, y_w$ ——水力裂缝微元的中心横、纵坐标, m;

[0081]  $x_{wDi}$ ——积分变量, 无因次;

[0082]  $x_{f1m}$ ——第  $m$  条水力裂缝左翼裂缝长度, m;

[0083]  $R_D$ ——某一裂缝微元中心到地层某一点的距离, 无因次;

[0084]  $\bar{q}_{fiD}$ ——第  $i$  条裂缝的无因次流量; 无因次;

[0085]  $s$ ——拉普拉斯变量, 无因次;

[0086]  $\alpha_m$ ——第  $m$  条水力裂缝与  $y$  轴的夹角,  $^\circ$ ;

[0087]  $M$ ——页岩气藏水平井压裂产生水力裂缝的条数;

[0088]  $K_0$ ——零阶第二类修正 Bessel 函数。

[0089] 所述步骤 (3) 过程如下:

[0090] 首先根据等效面积原则建立水力裂缝渗流模型, 得到气体在水力裂缝中作平面径向流时的渗流公式 (Mukherjee H, Economides M J. A parametric comparison of horizontal and vertical well performance [J]. SPE Formation Evaluation, 1991, 6 (2): 209-216):

$$[0091] \quad \pi r_e^2 = (x_{f1m} + x_{f1m}) h \quad (15)$$

$$[0092] \quad p_{fm} - p_w = \frac{q_{fm} \mu}{2\pi k_F w_F} \ln \left( \frac{r_e}{r_w} \right) \quad (16)$$

[0093] 根据式 (15) 和 (16) 可得:

$$[0094] \quad p_{fm} - p_w = \frac{q_{fm} \mu}{2\pi k_F w_F} \ln \left( \frac{\sqrt{(x_{f1m} + x_{f1m}) h / \pi}}{r_w} \right) \quad (17)$$

[0095] 式中  $r_e$ ——等效为平面径向流后的供给半径, m;

[0096]  $r_w$ ——水平井筒半径, m;

[0097]  $x_{f1m}$ ——第  $m$  条水力裂缝的左翼缝长度, m;

[0098]  $x_{f1m}$ ——第  $m$  条水力裂缝的右翼缝长度, m;

[0099]  $p_{fm}$ ——第  $m$  条水力裂缝缝尖处的压力, Pa;

[0100]  $p_w$ ——水平井筒处压力, Pa;

[0101]  $q_{fm}$ ——第  $m$  条水力裂缝的流量;  $\text{m}^3/\text{s}$ 。

[0102] 考虑水力裂缝的有限导流能力,通过拉氏变换和扰动变换的方法可得到拉氏空间下的水力裂缝渗流模型(孔祥言.高等渗流力学[M].合肥:中国科学技术大学出版社,1999:202-206;Pedrosa O A.Pressure Transient Response in Stress-Sensitive Formations[J].SPE California Regional Meeting,1986),得到第m条水力裂缝在水平井筒处的压力计算公式:

$$[0103] \quad \bar{\xi}_{\text{wmD}} = \bar{\xi}_{\text{fmD}} + \frac{\bar{q}_{\text{fmD}}}{C_{\text{FD}}} \ln \left( \frac{\sqrt{(x_{\text{fmD}} + x_{\text{fmD}})h/\pi}}{r_{\text{wD}}} \right) \quad (18)$$

$$[0104] \quad \text{式中 } x_{\text{fmD}} = \frac{x_{\text{frm}}}{L_{\text{ref}}}; \quad r_{\text{wD}} = \frac{r_{\text{w}}}{L_{\text{ref}}}$$

[0105]  $x_{\text{frm}}$ ——第m条水力裂缝右翼裂缝长度,m;

[0106]  $\bar{\xi}_{\text{fmD}}$ ——无因次形式的第m条水力裂缝尖产生的压力;

[0107]  $\bar{\xi}_{\text{wmD}}$ ——无因次形式的第m条水力裂缝在水平井筒处的压力;

[0108]  $\bar{q}_{\text{fmD}}$ ——第m条水力裂缝的无因次流量。

[0109] 将第m条水力裂缝缝尖处的压力计算式代入,得到第m条水力裂缝在水平井筒处的压力表达式:

[0110]

$$\begin{aligned} \bar{\xi}_{\text{wmD}} = & \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^{2N} \frac{\bar{q}_{\text{fiD}} L_{\text{ref}}}{x_{\text{fli}} + x_{\text{fri}}} \int_{x_{\text{Dij}}}^{x_{\text{Dij}+1}} K_0 \left[ \sqrt{f(s)} R_D(x_{\text{D}}, y_{\text{D}}, x_{\text{wDi}}) \right] \sqrt{1 + \text{ctg}^2(\alpha_i)} dx_{\text{wDi}} \\ & + \frac{\bar{q}_{\text{fmD}}}{C_{\text{FD}}} \ln \left( \frac{\sqrt{(x_{\text{fmD}} + x_{\text{fmD}})h/\pi}}{r_{\text{wD}}} \right) \end{aligned} \quad (19)$$

$$[0111] \quad f(s) = \omega s + 3\lambda\sigma(1-\omega) \left[ \sqrt{s/\lambda} \coth(\sqrt{s/\lambda}) - 1 \right]$$

[0112] 所述步骤(4)包括以下内容:

[0113] 1) 假设水平井筒中的渗流不存在阻力,即第m条水力裂缝在水平井筒处的压力 $\bar{\xi}_{\text{wmD}}$ 等于井底压力 $\bar{\xi}_{\text{wD}}$ ,步骤(3)水力裂缝在水平井筒处的压力计算式中含有第m条水力裂缝的无因次流量 $\bar{q}_{\text{fmD}}$ 和井底压力 $\bar{\xi}_{\text{wD}}$ ,然后结合流量约束条件,并令 $m=1, 2, 3, \dots, M$ ,可得到包含 $\bar{q}_{\text{f1D}}, \bar{q}_{\text{f2D}}, \bar{q}_{\text{f3D}}, \dots, \bar{q}_{\text{fMD}}, \bar{\xi}_{\text{wD}}$ 的M+1个方程组合而成的方程组,将步骤(1)计算的参数代入,求解得到页岩气井定流量生产时的井底压力 $\bar{\xi}_{\text{wD}}$ 。

[0114] 2) 根据拉氏空间下页岩气井定流量生产时的井底压力 $\bar{\xi}_{\text{wD}}$ 与定井底压力生产时的气井流量 $\bar{q}_{\text{D}}$ 之间的转换关系,可得到拉氏空间下定井底压力生产时的页岩气井无因次流量 $\bar{q}_{\text{D}}$ ,然后通过数值反演和无因次流量定义,得到真实空间下的页岩气井流量q,即页岩气藏压裂水平井在非稳态扩散下的产能。

[0115] 具体过程如下:

[0116] 在式(19)中同时包含第 $m$ 条水力裂缝的无因次流量 $\bar{q}_{\text{fmD}}$ 和井底压力 $\bar{\xi}_{\text{wD}}$ ,令 $m=1, 2, 3, \dots, M$ ,则可以得到包含 $\bar{q}_{\text{f1D}}, \bar{q}_{\text{f2D}}, \bar{q}_{\text{f3D}}, \dots, \bar{q}_{\text{fMD}}$ 和 $\bar{\xi}_{\text{wD}}$ 共 $M+1$ 个未知量的 $M$ 个方程;然后结合流量约束条件:

$$[0117] \quad \sum_{i=1}^M \bar{q}_{\text{fiD}} = \frac{1}{s} \quad (20)$$

[0118] 可以得到 $M+1$ 个方程组成的方程组,用矩阵的形式表示为:

$$[0119] \quad \begin{bmatrix} F_{1,1} + f_1 & F_{1,2} & \cdots & F_{1,M} & -1 \\ F_{2,1} & F_{2,2} + f_2 & \cdots & F_{2,M} & -1 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ F_{M,1} & F_{M,2} & \cdots & F_{M,M} + f_M & -1 \\ 1 & 1 & \cdots & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{q}_{\text{f1D}} \\ \bar{q}_{\text{f2D}} \\ \cdots \\ \bar{q}_{\text{fMD}} \\ \bar{\xi}_{\text{wD}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \cdots \\ 0 \\ 1/s \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$[0120] \quad F_{m,i} = \sum_{j=1}^{2N} \frac{L_{\text{ref}}}{x_{\text{flm}} + x_{\text{fjm}}} \int_{x_{\text{Dij}}}^{x_{\text{Dj+1}}} K_0 \left[ \sqrt{f(s)} R_D(x_D, y_D, x_{\text{wDi}}) \right] \sqrt{1 + \text{ctg}^2(\alpha_i)} dx_{\text{wDi}} \quad (22)$$

$$[0121] \quad f_m = \frac{1}{C_{\text{FD}}} \ln \left( \frac{\sqrt{(x_{\text{fmD}} + x_{\text{fMD}}) h / \pi}}{r_{\text{wD}}} \right) \quad (23)$$

[0122] 其中 $m=1, 2, 3, \dots, M; i=1, 2, 3, \dots, M$ 。

[0123] 通过高斯法(李庆扬,王能超,易大义.数值分析(第5版)[M].清华大学出版社,北京:2008)求解矩阵方程组(21),可以得到页岩气井定流量生产时的井底压力 $\bar{\xi}_{\text{wD}}$ 。

[0124] 根据拉氏空间下页岩气井定流量生产时的井底压力 $\bar{\xi}_{\text{wD}}$ 与定井底压力生产时的气井流量 $\bar{q}_{\text{D}}$ 之间的转换关系(Van Everdingen AF, Hurst W. The application of the Laplace transformation to flow problems in reservoirs[J]. Journal of Petroleum Technology, 1949, 1(12): 305-324),得到拉氏空间下定井底压力生产时的页岩气井无因次流量 $\bar{q}_{\text{D}}$

$$[0125] \quad \bar{\varphi}_{\text{wHD}} = -\frac{1}{\gamma_{\text{D}}} \ln \left[ 1 - \gamma_{\text{D}} \bar{\xi}_{\text{wD}} \right] \quad (24)$$

$$[0126] \quad \bar{q}_{\text{D}} = \frac{1}{s^2 \bar{\varphi}_{\text{wHD}}} \quad (25)$$

[0127] 通过数值反演(同登科,陈钦雷.关于Laplace数值反演Stehfest方法的一点笔记[J].石油学报,2001,22(6):91-92)得到真实空间下的页岩气井无因次流量 $q_{\text{D}}$ ,最后利用无因次流量定义计算页岩气井流量 $q$ ,即页岩气藏压裂水平井在非稳态扩散下的产能:

$$[0128] \quad q = q_{\text{D}} \times q_{\text{sc}} \quad (26)$$

[0129] 本发明所涉及的公式较多,若一一列出会显得累赘,为了保证本发明的简洁直观

性,在此只列出了计算产量时必要的计算公式和参数,对于未给出的计算公式和参数则写出了相应的参考文献。

[0130] 与现有技术相比,本发明的有益效果为:

[0131] (1) 该方法考虑页岩气藏的实际运移机理,通过非稳态扩散的方式流入天然裂缝,并且考虑天然裂缝的应力敏感效应,利用面积等效原则建立考虑有限导流能力的水力裂缝渗流模型,采用点源函数方法和压降叠加原理求出水力裂缝在水平井筒处的压力表达式,然后通过求解矩阵方程组得到拉氏空间下的井底压力,最后通过转换关系得到页岩气井的产量。该方法求解产量思路清晰,操作简便。

[0132] (2) 该方法建立的模型考虑因素比较全面,求解速度快,前期不需要大量的储层参数,并且计算准确度高。

### 附图说明

[0133] 图1为页岩气藏多级压裂水平井裂缝离散模型示意图。

[0134] 图2为某页岩气井生产600天的实际产量递减曲线和计算得到产量曲线的对比图。

### 具体实施方式

[0135] 以下结合附图和现场实际数据对本发明作进一步说明。

[0136] 以某口页岩气井为例,该井所在的页岩储层厚度为30m,页岩储层平均孔隙度为0.08,页岩基质渗透率为 $2.5 \times 10^{-9}$ mD,天然裂缝系统的渗透率为0.015mD,可见该页岩气藏为超低渗、低孔储层,需要进行压裂改造才能产生工业气流,页岩气藏的具体参数如表1所示。

[0137] 表1某口页岩气井基本参数表

[0138]

地层原始压力 (Pa)	$2.96 \times 10^7$	井底压力 (Pa)	$3.45 \times 10^6$
储层厚度 (m)	30.48	储层温度 (K)	333.15
水平井段长度 (m)	610	表皮系数 (无因次)	0.035
页岩孔隙度	0.08	裂缝渗透率 ( $\text{m}^2$ )	$2 \times 10^{-11}$
应力敏感系数 ( $\text{Pa}^{-1}$ )	0.01	扩散系数 ( $\text{m}^2/\text{s}$ )	$2 \times 10^{-12}$
原始条件下气体黏度 ( $\text{Pa} \cdot \text{s}$ )	$2.308 \times 10^{-5}$	水力裂缝宽度 (m)	0.005
井筒储集系数 (无因次)	10	基质块半径 (m)	0.001
井筒半径 (m)	0.1	天然裂缝系统初始渗透率 ( $\text{m}^2$ )	$1.5 \times 10^{-17}$
页岩气比重	0.57	原始条件下气体压缩系数 ( $\text{Pa}^{-1}$ )	$4.39 \times 10^{-8}$
Langmuir 压力 $P_L$ (Pa)	$4 \times 10^6$	Langmuir 体积 $V_L$ ( $\text{m}^3/\text{m}^3$ )	10

[0139] 一种页岩气藏压裂水平井非稳态扩散下产能计算方法,依次包括以下步骤:

[0140] 步骤1,计算中间参数弹性储容比 $\omega$ 、非稳态扩散窜流系数 $\lambda$ 、无因次渗透率模量 $\gamma_D$ 、页岩气吸附解吸系数 $\sigma$ 、裂缝导流能力 $C_{FD}$ ,方便后面方程求解;

[0141] 步骤2,根据收集的水力裂缝参数,在平面直角坐标系中绘制出水力裂缝的位置分布情况,把每条水力裂缝分割成若干微元(图1所示),然后根据式(8)~(11)确定离散后每个水力裂缝微元及每条水力裂缝缝尖的坐标位置,再得到所有水力裂缝生产时对各条水力

裂缝尖端所产生的压力表达式；

[0142] 步骤3,根据每条水力裂缝缝尖处的压力,得到水力裂缝在水平井筒处的压力表达式；

[0143] 步骤4,将式(12)和式(18)联立可得到页岩气藏所有水力裂缝在水平井筒处的压力,结合流量约束条件,通过高斯法求解矩阵方程组式(21),可得到页岩气井定流量生产时的井底压力 $\bar{\xi}_{\text{WD}}$ ;然后根据式(25)计算得到定井底压力条件下页岩气井拉氏空间下的无因次流量,然后采用数值反演方法得到真实空间下页岩气井无因次流量,最后利用无因次流量定义式(26),可得到页岩气井流量。

[0144] 从图2可以看出,利用本方法计算得到的页岩气井产量能够很好地吻合实际生产曲线,误差比较小,说明本发明提供的页岩气藏压裂水平井非稳态扩散下的产能计算方法较为合理,而且还可以直观地预测页岩气井后期产量递减趋势,指导压裂水平井参数优化设计以及评估压裂改造有效性。

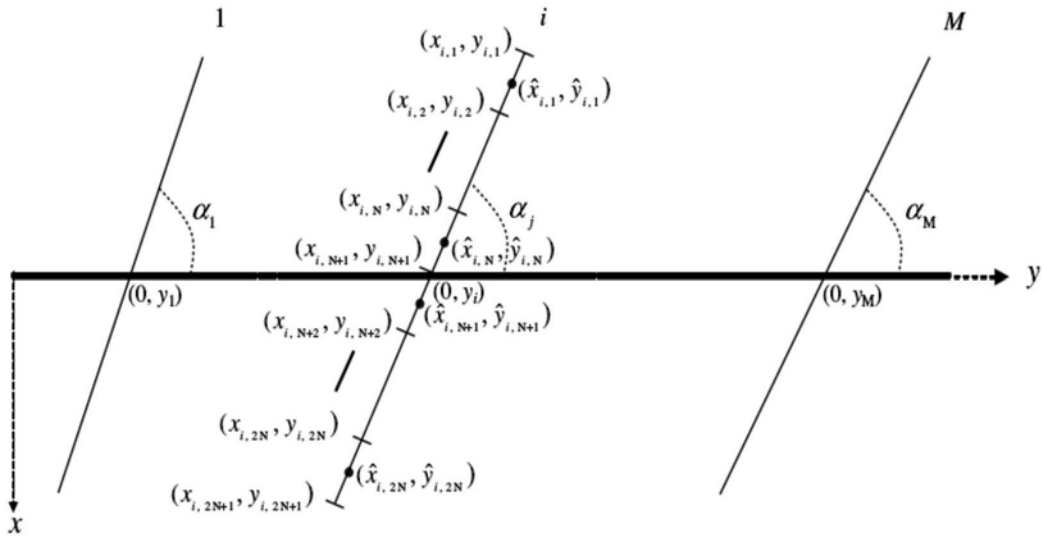


图1

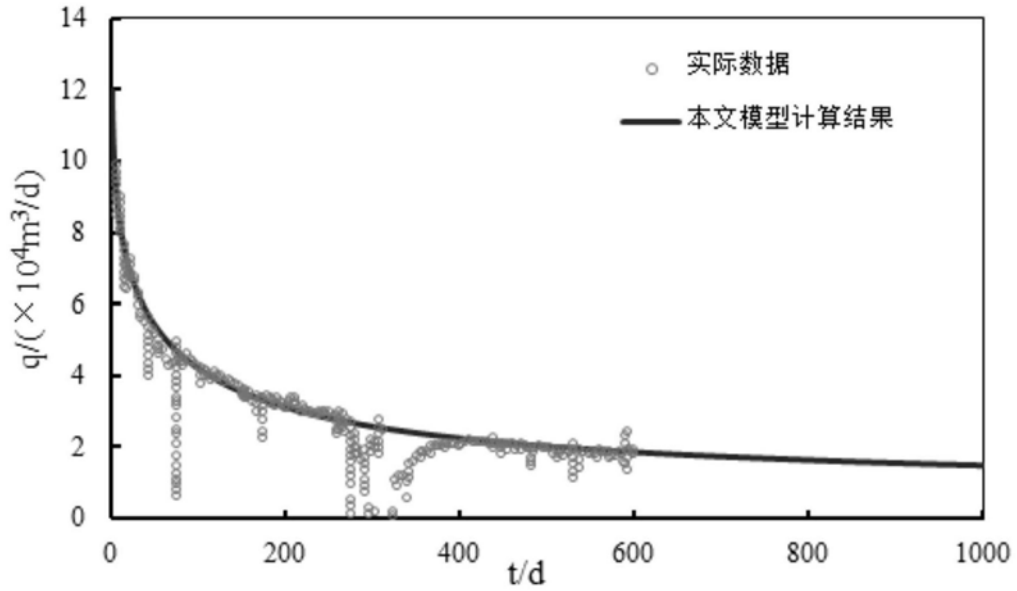


图2