



# (12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 107704646 B

(45) 授权公告日 2021.06.01

(21) 申请号 201710683799.2

G06F 119/14 (2020.01)

(22) 申请日 2017.08.11

(56) 对比文件

(65) 同一申请的已公布的文献号

CN 104278980 A, 2015.01.14

申请公布号 CN 107704646 A

CN 105604546 A, 2016.05.25

CN 106168675 A, 2016.11.30

(43) 申请公布日 2018.02.16

CN 105046006 A, 2015.11.11

CN 106202737 A, 2016.12.07

(73) 专利权人 中国石油天然气股份有限公司

地址 100007 北京市东城区东直门北大街9号

王文雄等. 致密油藏体积压裂建模理论与方法.《断块油气田》.2014, 第21卷(第4期),

李娜等. 利用压力恢复试井法计算气井地层压力.《内蒙古石油化工》.2015, (第4期), 第35-37页.

(72) 发明人 李帅 丁云宏 王丽伟 刘广峰

陈芳芳等. 裂缝性基岩储层三维地质建模研究.《青海石油》.2014, 第32卷(第3期),

(74) 专利代理机构 北京三友知识产权代理有限公司 11127

代理人 姚亮 沈金辉

审查员 王璇

(51) Int. Cl.

G06F 30/20 (2020.01)

G06F 111/10 (2020.01)

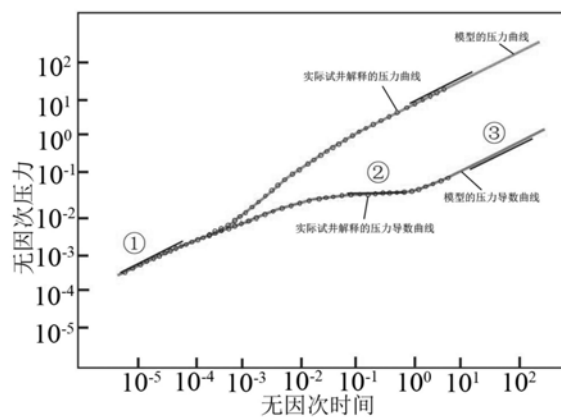
权利要求书1页 说明书6页 附图2页

## (54) 发明名称

一种致密储层体积改造后的建模方法

## (57) 摘要

本发明提供了一种致密储层体积改造后的建模方法。该建模方法为：分别建立单一介质-裂缝模型、单一介质-裂缝-SRV模型、双重介质-裂缝模型和双重介质-裂缝-SRV模型四种基本模型；在同一产量下定量生产，关井后进行压力恢复试井测试，得到识别曲线；根据油田现场压裂井实际生产数据得到试井解释曲线，将其与四种基本模型的识别曲线进行对比，寻找相符合的识别曲线及对应的模型；通过测井数据建立初步的基质模型和裂缝模型；通过历史拟合方法进行模型参数的校正，从而建立得到最终模型。本发明的建模方法简单方便，不需要传统DFN建模中的详细裂缝参数，也不需要成像测井数据，避免了成像测井过程的人力、物力和时间的投入，节约成本。



1. 一种致密储层体积改造后的建模方法,其特征在于,该致密储层体积改造后的建模方法包括以下步骤:

步骤一,针对致密储层体积改造后的压裂井分别建立单一介质-裂缝模型、单一介质-裂缝-SRV模型、双重介质-裂缝模型和双重介质-裂缝-SRV模型四种基本模型;

步骤二,设置四种基本模型在同一产量下定量生产,然后关井进行压力恢复试井测试,根据测试数据,绘制四种基本模型的识别曲线;所述识别曲线包括各基本模型的压力与关井时间的对数曲线和各基本模型的压力导数与关井时间的对数曲线;

步骤三,根据油田现场压裂井实际生产数据进行试井解释,得到试井解释曲线,将实际获得的试井解释曲线与四种基本模型的识别曲线进行对比,寻找相符合的识别曲线以及其对应的模型类型,即为最佳模型;

步骤四,通过测井数据建立最佳模型初步的基质模型和裂缝模型;具体包括:

利用确定性建模方法建立地层格架模型;

采用序贯指示模型方法和序贯指示模型协同二维趋势面约束法建立沉积微相模型;

以岩相模型为约束条件,利用变差函数分析进行随机模拟,建立属性模型;

地层格架模型、沉积微相模型和属性模型共同构成了基质模型;

步骤五,通过历史拟合方法,校正最佳模型初步的基质模型的参数和裂缝模型的参数,优化数值,从而建立得到最终模型。

2. 根据权利要求1所述的建模方法,其特征在于:当所述最佳模型选择为双重介质-裂缝模型或双重介质-裂缝-SRV模型时,还包括利用公式(1)计算裂缝步长的步骤:

$$\lambda = \frac{12r_w^2 K_m}{L^2 K_f} \quad (1)$$

其中:L为裂缝步长,m; $\lambda$ 为窜流系数,无因次; $r_w$ 为井径,m; $K_m$ 为基质渗透率,mD; $K_f$ 为平均裂缝渗透率,mD。

3. 根据权利要求1所述的建模方法,其特征在于:所述基质模型的参数包括基质孔隙度、基质渗透率和基质饱和度。

4. 根据权利要求1所述的建模方法,其特征在于:所述裂缝模型的参数包括裂缝孔隙度、裂缝渗透率、裂缝饱和度和裂缝导流能力。

5. 根据权利要求4所述的建模方法,其特征在于:当所述最佳模型选择为双重介质-裂缝模型或双重介质-裂缝-SRV模型时,所述裂缝模型的参数还包括裂缝步长。

## 一种致密储层体积改造后的建模方法

### 技术领域

[0001] 本发明属于油气田开发技术领域,涉及一种致密储层体积改造后的建模方法。

### 背景技术

[0002] 致密储层、页岩储层作为一种重要的非常规油气资源,近年来越来越多地受到了重视。“水平井+分段多簇射孔+体积压裂”的改造模式已经成为该类储层有效开发的关键技术。由于致密储层所具有的天然裂缝发育、岩石脆性程度高以及储层主应力差小等突出特点,该类储层在体积改造后,容易导致人工裂缝与天然裂缝相互沟通,最终形成错综复杂的裂缝网络形态。

[0003] 由于体积改造形成的裂缝极为复杂,现阶段针对该类储层体积改造后的模拟方法主要有以下几种:一是直接建立基质模型,并对压裂井周围的表皮系数和渗透率进行人为修改。该方法所建立的基质模型仅能反映储层基质的流动情况,无法包含体积改造后形成的复杂裂缝体系。而人为修改表皮系数或者渗透率,对后期的生产预测具有相当的不确定性。二是采用DFN建模方法,该方法建立的裂缝系统需要成像测井参数,即采用成像测井的方法获得裂缝的倾角、方位、步长、密度等。而成像测井价格昂贵,且耗时较长,严重影响油田正常生产进度。

### 发明内容

[0004] 为解决以上两种方法对体积改造后储层建模的局限性,本发明的目的在于提供了一种致密储层体积改造后的建模方法。该方法通过优选最佳模型及其识别曲线,并通过测井数据和试井数据建立前期粗糙模型,然后通过历史拟合的方法反演模型详细参数,修正前期粗糙模型,最终通过优化调整,建立一种简单的致密储层体积改造后的模型。

[0005] 本发明的目的通过以下技术方案得以实现:

[0006] 本发明提供一种致密储层体积改造后的建模方法,该致密储层体积改造后的建模方法包括以下步骤:

[0007] 步骤一,针对致密储层体积改造后的压裂井分别建立单一介质-裂缝模型、单一介质-裂缝-SRV模型、双重介质-裂缝模型和双重介质-裂缝-SRV模型四种基本模型;

[0008] 步骤二,设置四种基本模型在同一产量下定量生产,然后关井进行压力恢复试井测试,根据测试数据,绘制四种基本模型的识别曲线;

[0009] 步骤三,根据油田现场压裂井实际生产数据进行试井解释,得到试井解释曲线,将实际获得的试井解释曲线与四种基本模型的识别曲线进行对比,寻找相符合的识别曲线以及其对应的模型类型,即为最佳模型;

[0010] 步骤四,通过测井数据建立最佳模型初步的基质模型和裂缝模型;

[0011] 步骤五,通过历史拟合方法,校正最佳模型初步的基质模型的参数和裂缝模型的参数,优化数值,从而建立得到最终模型。

[0012] 上述建模方法中,在步骤三中,“寻找相符合的识别曲线”是指将实际获得的试井

解释曲线与四种基本模型的识别曲线进行对比,选择相比最接近的曲线。

[0013] 上述建模方法中,致密油藏储层岩石主要具有三个特征,即储层岩石脆性程度高、天然微小裂缝发育、最大最小主应力差别大,在这三个条件下进行的体积改造,将会可能使得天然裂缝与人工裂缝相互串联,形成一个较大的裂缝体积。然而,并非所有的储层都可以形成裂缝体积,因此,我们选择四种模型,这四种模型,从不同程度上描述了所形成的裂缝体积发育程度,以“单一介质+裂缝模型”代表的裂缝发育程度最低,以“双重介质+裂缝+SRV模型”代表裂缝发育程度最高。这四种模型是本领域最常见的四种模型。

[0014] 上述建模方法中,单一介质是指整个模型为单孔单渗,模型只有一套孔隙度、渗透率、饱和度参数;双重介质模型是指整个模型仅有一套储存空间,但有两套孔、渗、饱等属性参数,即同一网格处分别有一套基质参数和一套裂缝参数。四种模型建立过程中,所有的网格类型、网格步长,网格数量等参数均保持一致,保证四个模型具有相同的原始地质储量。

[0015] 上述建模方法中,优选地,所述识别曲线包括各基本模型的压力(指:井底流压压力)与关井时间的对数曲线和各基本模型的压力导数与关井时间的对数曲线。

[0016] 上述建模方法中,优选地,当所述最佳模型选择为双重介质-裂缝模型或双重介质-裂缝-SRV模型时,还包括利用公式(1)计算裂缝步长的步骤:

$$[0017] \quad \lambda = \frac{12r_w^2 K_m}{L^2 K_f} \quad (1)$$

[0018] 其中:L为裂缝步长,m; $\lambda$ 为窜流系数(通过试井解释获得),无因次; $r_w$ 为井径(通过钻井数据获得),m; $K_m$ 为基质渗透率(通过岩心测试获得),mD; $K_f$ 为平均裂缝渗透率(通过试井解释获得),mD。

[0019] 上述建模方法中,公式(1)是通过公式(2)和(3)推导得到的:

$$[0020] \quad \lambda = \alpha r_w^2 \frac{K_m}{K_f} \quad (2)$$

[0021] 式中, $\lambda$ 为窜流系数(通过试井解释获得),无因次; $r_w$ 为井径(通过钻井数据获得),m; $K_m$ 为基质渗透率(通过岩心测试获得),mD; $K_f$ 为平均裂缝渗透率(通过试井解释获得),mD。

[0022] 进一步,

$$[0023] \quad \alpha = 4 \left( \frac{1}{L_x^2} + \frac{1}{L_y^2} + \frac{1}{L_z^2} \right) \quad (3)$$

[0024]  $L_x, L_y, L_z$ 分别为裂缝在x,y,z三个方向的裂缝步长,m。本发明中设定三个方向裂缝步长相同,则由公式(2)和(3)换算得到公式(1)。

[0025] 上述建模方法中,优选地,通过测井数据建立基质模型包括以下步骤:

[0026] 利用确定性建模方法建立地层格架模型;

[0027] 采用序贯指示模型方法和序贯指示模型协同二维趋势面约束法建立沉积微相模型;

[0028] 以岩相模型为约束条件,利用变差函数分析进行随机模拟,建立属性模型;

[0029] 地层格架模型、沉积微相模型和属性模型共同构成了基质模型。

[0030] 上述建模方法中,优选地,所述基质模型的参数包括基质孔隙度、基质渗透率和基质饱和度。上述建立的地层格架模型、沉积微相模型和属性模型获得的基质孔隙度、基质渗透率、基质饱和度等参数计算得到的基质孔隙度、基质渗透率和基质饱和度各自的均值即为该基质模型的基质孔隙度、基质渗透率和基质饱和度参数。

[0031] 上述建模方法中,优选地,所述裂缝模型的参数包括裂缝孔隙度、裂缝渗透率、裂缝饱和度和裂缝导流能力。

[0032] 上述建模方法中,优选地,当所述最佳模型选择为双重介质-裂缝模型或双重介质-裂缝-SRV模型时,所述裂缝模型的参数还包括裂缝步长。

[0033] 本发明的一种致密储层体积改造后的建模方法,建模简单,通过现场实际试井曲线与模型的指示曲线的对比,可清楚知道所需建立的模型类型,避免选错模型。所建立的裂缝模型参数可以通过试井解释和历史拟合反演获得,不需要传统DFN建模中的详细裂缝参数(比如裂缝的倾角、方位、步长、密度等),也不需要成像测井数据,避免了成像测井过程的人力、物力和时间的投入,节约成本。

## 附图说明

[0034] 图1为实施例中致密储层体积改造后建立的四种基本模型示意图((1)单一介质-裂缝模型,(2)单一介质-裂缝-SRV模型,(3)双重介质-裂缝模型,(4)双重介质-裂缝-SRV模型);

[0035] 图2为实施例中四种基本模型压力恢复试井指示曲线((1)单一介质-裂缝模型,(2)单一介质-裂缝-SRV模型,(3)双重介质-裂缝模型,(4)双重介质-裂缝-SRV模型);

[0036] 图3为实施例1中现场实际试井解释曲线与单一介质-裂缝-SRV模型指示曲线对比图;

[0037] 图4为实施例2中现场实际试井解释曲线与双重介质-裂缝-SRV模型指示曲线对比图。

## 具体实施方式

[0038] 为了对本发明的技术特征、目的和有益效果有更加清楚的理解,现对本发明的技术方案进行以下详细说明,但不能理解为对本发明的可实施范围的限定。

[0039] 实施例1

[0040] 本发明提供长庆油田一口致密储层体积改造井进行建模的方法,包括以下步骤:

[0041] 步骤一,如图1所示,针对致密储层体积改造后的压裂井分别建立单一介质-裂缝型(如图1中的(1)所示)、单一介质-裂缝-SRV区型(如图1中的(2)所示)、双重介质-裂缝型(如图1中的(3)所示)和双重介质-裂缝-SRV区型四种基本模型(如图1中的(4)所示)。

[0042] 单一介质是指整个模型为单孔单渗,模型只有一套孔隙度、渗透率、饱和度参数;双重介质模型是指整个模型仅有一套储存空间,但有两套孔、渗、饱等属性参数,即同一网格处分别有一套基质参数和一套裂缝参数。四种模型建立过程中,所有的网格类型、网格步长,网格数量等参数均保持一致,保证四个模型具有相同的原始地质储量。

[0043] 步骤二,设置四种基本模型在同一产量下定量生产,设置井口产量为每天 $10\text{cm}^3$ ,定产生产3个月后,关井进行压力恢复试井压力恢复测试,整个恢复试井时间也为3个月,恢

复试井结束后,绘制模型的井底流压压力、井底流压压力的导数与关井时间的对数曲线,根据各模型的压力曲线的特征曲线,获得四种基本模型的识别曲线,实验结果如图2所示。

[0044] 图2中的(1)为单一介质-裂缝模型压力恢复试井指示曲线,该指示曲线分两段,前期的压力曲线和压力导数曲线平行,且斜率均为1/2,后期压力导数曲线逐渐接近水平;图2中的(2)为单一介质-裂缝-SRV模型压力恢复试井指示曲线,该指示曲线分三段,前期压力和压力导数平行上升,斜率为1/2,中期压力导数曲线趋于水平,后期压力导数曲线继续上升,斜率为1/2;图2中的(3)为双重介质-裂缝模型压力恢复试井指示曲线,该指示曲线分三段,前期平行上升,中期有一个显示基质向裂缝窜流的“凹槽”,后期上升并逐渐接近水平;图2中的(4)为双重介质-裂缝-SRV模型压力恢复试井指示曲线,该指示曲线分四段,前期平行上升,中期有基质向裂缝窜流的“凹槽”,再以1/2斜率平行上升,最终达到水平。

[0045] 步骤三,根据本实施例长庆油田一口致密储层体积改造井的实际生产数据进行试井解释,得到试井解释曲线,将实际获得的试井解释曲线与四种基本模型的识别曲线进行对比,寻找相符合的识别曲线以及其对应的模型类型,即为最佳模型;如图3所示,现场实际压力恢复试井解释结果为图3中小圆圈所绘成的曲线,其分布特征与模型“单一介质-裂缝-SRV模型”识别曲线形状一致,其压力导数曲线均可分为三部分:①早期线性流(压力导数曲线斜率为1/2),②裂缝径向流(压力导数曲线斜率为0)③和系统线性流(压力导数曲线斜率为1/2)三个过程。根据此识别曲线与四个基本模型的识别曲线进行对比,确定建立的最佳模型为“单一介质-裂缝-SRV模型”。

[0046] 步骤四,通过测井数据建立该最佳模型初步的基质模型和裂缝模型;

[0047] 通过测井数据建立基质模型包括以下步骤:

[0048] 利用确定性建模方法建立地层格架模型;

[0049] 采用序贯指示模型方法和序贯指示模型协同二维趋势面约束法建立沉积微相模型;

[0050] 以岩相模型为约束条件,利用变差函数分析进行随机模拟,建立属性模型;

[0051] 地层格架模型、沉积微相模型和属性模型共同构成了基质模型。

[0052] 由于指示曲线显示的是单一介质模型,不需计算裂缝步长L的大小。油田现场试井曲线解释得SRV区平均裂缝渗透率为24.10mD,实验室岩芯测量基质孔隙度为10%,基质平均渗透率为0.12mD。另外,还需要通过预估,初步设置模型基质饱和度为60%,基质孔隙度为10%,裂缝孔隙度为10%,裂缝饱和度为80%,裂缝导流能力为 $5\mu\text{m}^2 \cdot \text{cm}$ ,从而分别建立最佳模型初步的基质模型和裂缝模型。

[0053] 步骤五,通过历史拟合方法,调整初期设置的基质模型的参数(包括基质孔隙度、基质渗透率、基质饱和度等)和裂缝模型的参数(包括裂缝孔隙度、裂缝渗透率、裂缝饱和度、裂缝导流能力等),校正模型参数,优化数值,进一步修正前期建立的模型。校正最佳模型初步的基质模型的参数和裂缝模型的参数,优化数值,从而建立得到最终模型。历史拟合获得的裂缝模型参数如下:裂缝孔隙度3%,裂缝渗透率17.5mD,裂缝饱和度65%,裂缝导流能力 $2\mu\text{m}^2 \cdot \text{cm}$ ,从而建立得到最终的模型,整体模型建立完成后,可进行后续的井网优化、井排距优化、注水参数优化、生产预测等。

[0054] 模型初步预估参数和历史拟合修正参数对比结果如表1所述。

[0055] 表1

	基质部分			裂缝部分			
	孔隙度/%	渗透率/mD	饱和度/%	孔隙度/%	渗透率/mD	饱和度/%	裂缝导流能力/ $\mu\text{m}^2\cdot\text{cm}$
[0056] 模型初步参数	10	0.12	60	10	24.1	80	5
历史拟合修正	9.5	0.25	62.5	3	17.5	75	2

[0057] 实施例2

[0058] 本发明提供长庆油田另外一口致密储层体积改造井进行建模的方法,包括以下步骤:

[0059] 步骤一,如图1所示,针对致密储层体积改造后的压裂井分别建立单一介质-裂缝型(如图1中的(1)所示)、单一介质-裂缝-SRV区型(如图1中的(2)所示)、双重介质-裂缝型(如图1中的(3)所示)和双重介质-裂缝-SRV区型四种基本模型(如图1中的(4)所示)。

[0060] 步骤二,设置四种基本模型在同一产量下定量生产,设置井口产量为每天 $10\text{cm}^3$ ,定产生产3个月后,关井进行压力恢复试井压力恢复测试,整个恢复试井时间也为3个月,恢复试井结束后,绘制模型的井底流压压力、井底流压压力的导数与关井时间的对数曲线,根据各模型的压力曲线的特征曲线,获得四种基本模型的识别曲线,实验结果如图2所示。

[0061] 步骤三,根据本实施例长庆油田一口致密储层体积改造井的实际生产数据进行试井解释,得到试井解释曲线,将实际获得的试井解释曲线与四种基本模型的识别曲线进行对比,寻找相符合的识别曲线以及其对应的模型类型,即为最佳模型;如图4所示,这口井现场实际压力恢复试井解释结果为图4中小圆圈所绘成的曲线,其分布特征与模型“双重介质-裂缝-SRV模型”识别曲线形状一致,其压力导数曲线均可分为四部分:①早期线性流(压力导数曲线斜率为 $1/2$ ),②基质向裂缝的窜流(压力导数曲线呈现下凹段),③裂缝线性流(压力曲线和压力导数曲线平行上升),④系统拟径向流(压力导数呈水平状)。根据此识别曲线与四个基本模型的识别曲线进行对比,确定建立的最佳模型为“双重介质-裂缝-SRV模型”。

[0062] 步骤四,通过测井数据建立该最佳模型初步的基质模型和裂缝模型;

[0063] 通过测井数据建立基质模型包括以下步骤:

[0064] 利用确定性建模方法建立地层格架模型;

[0065] 采用序贯指示模型方法和序贯指示模型协同二维趋势面约束法建立沉积微相模型;

[0066] 以岩相模型为约束条件,利用变差函数分析进行随机模拟,建立属性模型;

[0067] 地层格架模型、沉积微相模型和属性模型共同构成了基质模型。

[0068] 油田现场试井曲线解释得基质向裂缝的窜流系数为 $1.56 \times 10^{-3}$ ,SRV区平均裂缝渗透率为 $3.10\text{mD}$ ,实验室岩芯测量基质孔隙度为 $12.5\%$ ,基质平均渗透率为 $0.25\text{mD}$ ,根据下述公式

$$[0069] \quad \lambda = \frac{12r_w^2 K_m}{L^2 K_f}$$

[0070] 其中:L为裂缝步长,m; $\lambda$ 为窜流系数,无因次; $r_w$ 为井径,m; $K_m$ 为基质渗透率,mD; $K_f$ 为平均裂缝渗透率,mD。可初步计算得裂缝步长为77.21m。另外,还需要通过预估,初步设置模型基质饱和度为60%,裂缝孔隙度为2%,裂缝饱和度为85%,裂缝导流能力为 $5\mu\text{m}^2 \cdot \text{cm}$ ,从而分别建立最佳模型初步的基质模型和裂缝模型。

[0071] 步骤五,通过历史拟合方法,调整初期设置的基质模型的参数(包括基质孔隙度、基质渗透率、基质饱和度等)和裂缝模型的参数(包括裂缝孔隙度、裂缝渗透率、裂缝饱和度、裂缝步长、裂缝导流能力等),校正模型参数,优化数值,进一步修正前期建立的模型。校正最佳模型初步的基质模型的参数和裂缝模型的参数,优化数值,从而建立得到最终模型。历史拟合获得的裂缝模型参数如下:裂缝孔隙度1.25%,裂缝渗透率6.5mD,裂缝饱和度62.5%,裂缝导流能力 $1.5\mu\text{m}^2 \cdot \text{cm}$ ,裂缝步长26.5m。

[0072] 模型初步预估参数和历史拟合修正参数对比结果如表2所述。

[0073] 表2

	基质部分			裂缝部分				
	孔隙度/%	渗透率/mD	饱和度/%	孔隙度/%	渗透率/mD	饱和度/%	裂缝导流能力/ $\mu\text{m}^2 \cdot \text{cm}$	裂缝步长/m
[0074] 模型初步参数	12.5	0.25	60	2	3.1	85	5	77.21
历史拟合修正	11.5	0.3	55.5	1.25	6.5	62.5	1.5	26.5

[0075] 通过现场实际试井曲线与模型的指示曲线的对比,可清楚知道所需建立的模型类型,避免选错模型。所建立的裂缝模型参数可以通过试井解释和历史拟合反演获得,不需要传统DFN建模中的详细裂缝参数(比如裂缝的倾角、方位、步长、密度等),也不需要进行成像测井,缩小了人力、物力和时间成本。



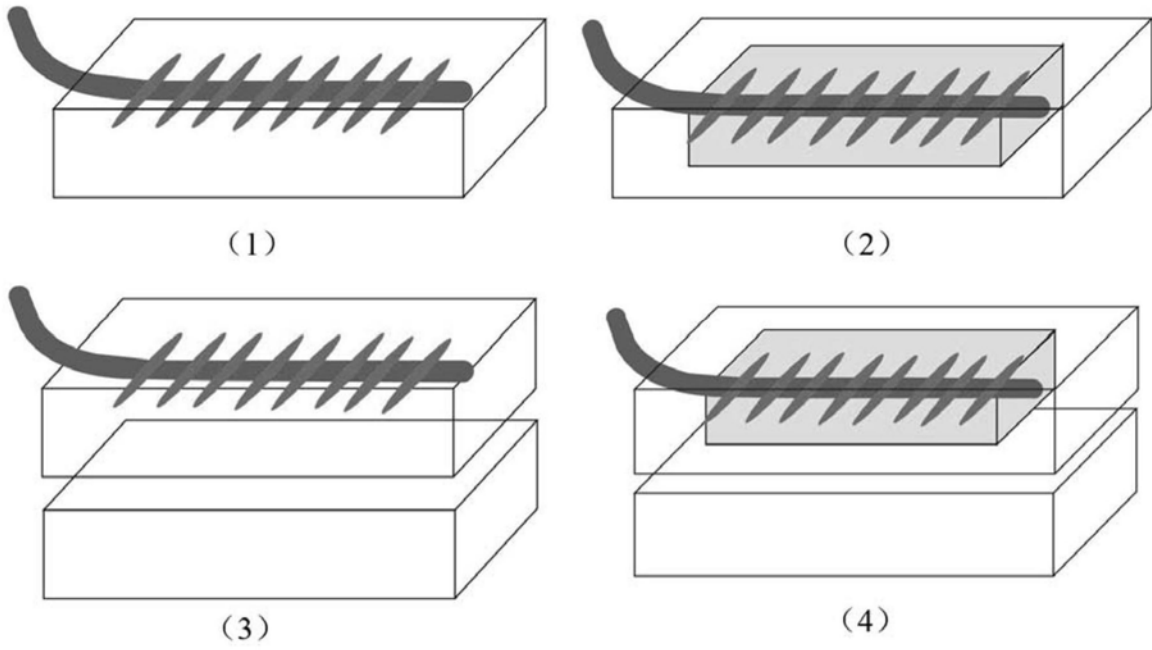


图1

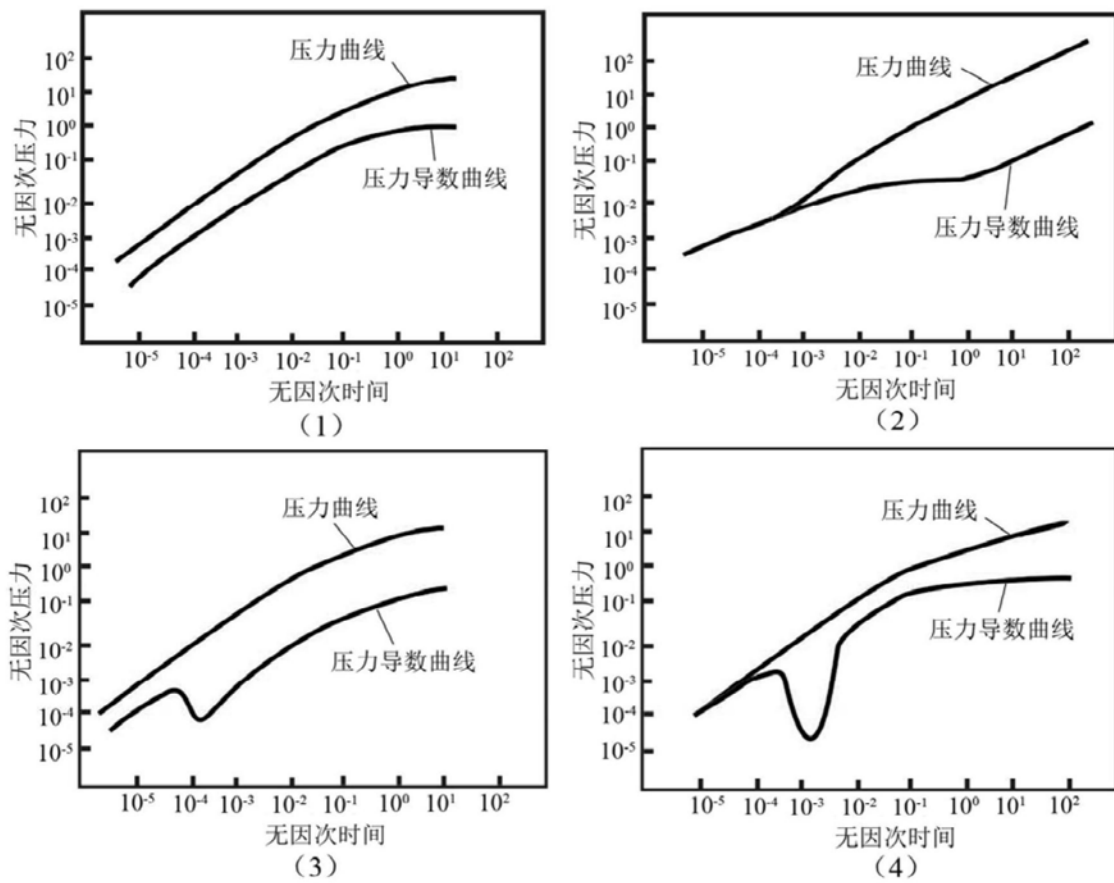


图2

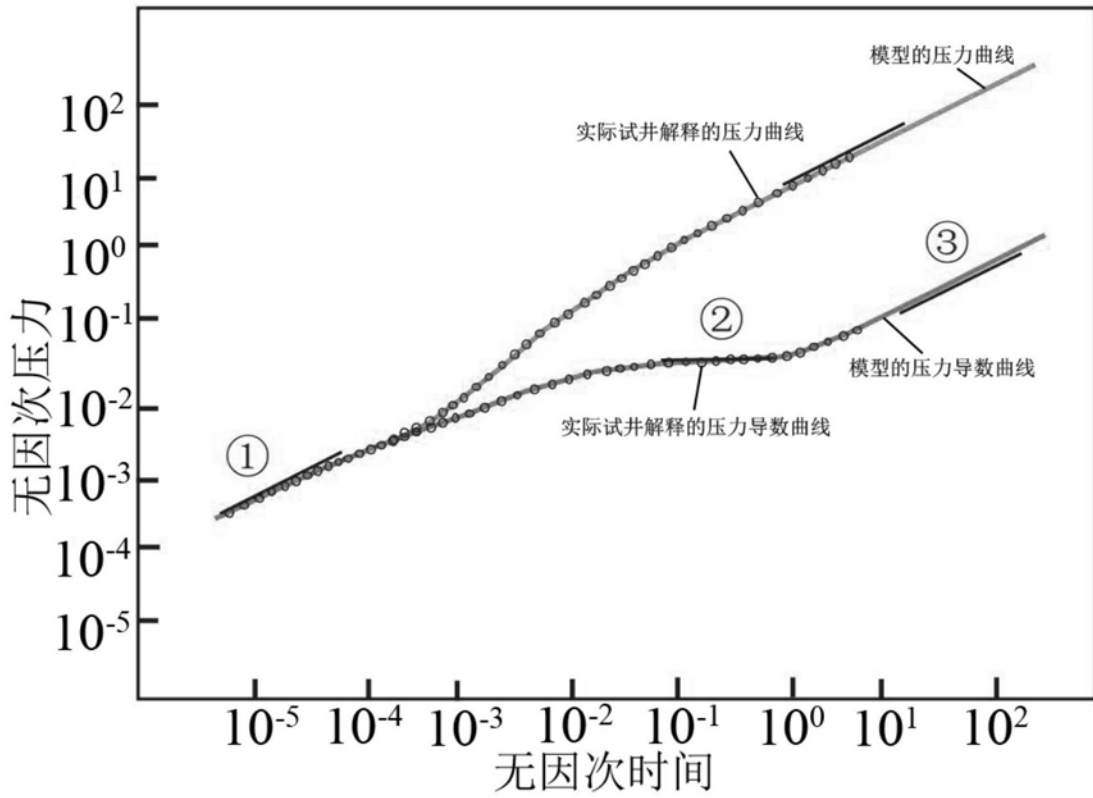


图3

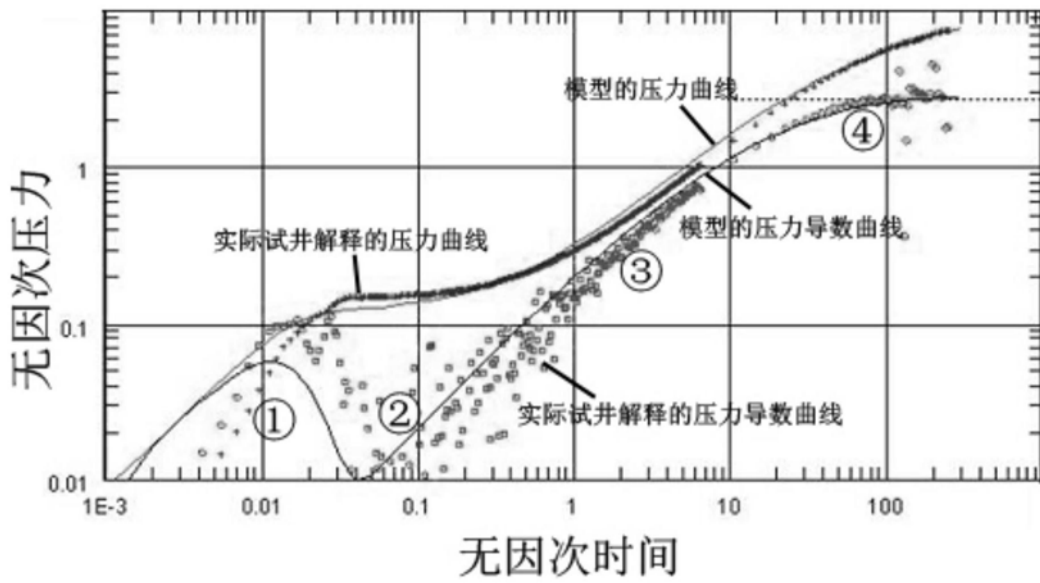


图4