



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 113236238 B

(45) 授权公告日 2022.03.01

(21) 申请号 202110545160.4

(22) 申请日 2021.05.19

(65) 同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 113236238 A

(43) 申请公布日 2021.08.10

(73) 专利权人 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 丁乙 刘向君 梁利喜 余小龙
刘叶轩 周鑫

(74) 专利代理机构 成都熠邦鼎立专利代理有限公司 51263
代理人 李晓英

(51) Int. Cl.
E21B 49/00 (2006.01)
E21B 43/26 (2006.01)

(56) 对比文件
US 2017315249 A1, 2017.11.02
CN 104775810 A, 2015.07.15
CN 110348032 A, 2019.10.18
US 2021003005 A1, 2021.01.07

CN 111411945 A, 2020.07.14

CN 110529088 A, 2019.12.03

CN 104777035 A, 2015.07.15

CN 112304838 A, 2021.02.02

CN 108825223 A, 2018.11.16

CN 108073786 A, 2018.05.25

Atefeh Jahandideh, Behnam Jafarpour. "Optimization of Hydraulic Fracturing Design under Spatially Variable Shale Fracability".《society of petroleum engineers》.2014,全文.

李旻翹,等.“基于组合权重法的页岩气水平井段评价模型及其应用”.《数学的实践与认识》.2020,第50卷(第13期),全文.

唐颖,等.“页岩储层可压裂性影响因素及评价方法”.《地学前缘》.2012,第19卷(第5期),全文.

韩蓬.“基于裂缝影响的页岩储层可压性评价方法”.《中国优秀硕士学位论文全文数据库(工程科技I辑)》.2018,(第4期),第44-49页.

(续)

审查员 张超

权利要求书2页 说明书7页 附图3页

(54) 发明名称
一种层理性页岩地层可压性指数预测方法

(57) 摘要

本发明涉及层理性页岩地层可压性指数预测方法,包括:获取页岩地层的多个影响因素,所述多个影响因素包括页岩层理发育特征参数、层理力学参数、基体力学参数及页岩地层应力状态参数;将所述多个影响因素中的每个影响因素进行归一化处理,得到所述每个影响因素的归一化值;基于数值模拟方法和所述多个影响因素,获得所述多个影响因素中每个影响因素的权重系数;基于预设公式、所述每个影响因素的归一化值以及所述每个影响因素的权重系数,获得所述页岩地层的可压性指数值。本发明将页岩基体与层理特征引入可压性评价,建立了适用于页岩地

层的可压性评价方法。



CN 113236238 B

[接上页]

(56) 对比文件

李新. “页岩气储层岩石物理实验及可压裂性表征研究”.《中国博士学位论文全文数据库(工程科技I辑)》.2017, (第5期), 第75-108页.

Zhengwen Zeng. “A Single Core Test for Fracability, Breakdown Pressure and Fracture Conductivity”.《society of petroleum engineers》.2017,全文.

杨杨. “深层页岩气压裂优化设计及效果评估研究”.《中国优秀硕士学位论文全文数据库(工程科技I辑)》.2019, (第2期), 第14-16页.

刘晓,等. “煤岩缝网改造关键因素分析及应用研究”.《煤炭科学技术》.2017,第45卷(第6

期),全文.

谢刚,等. “四川页岩储层可压裂性测井评价方法”.《2016年全国天然气学术年会论文集》.2016,全文.

张景轩,等. “硬脆性页岩断裂韧性二维数值模拟研究”.《复杂油气藏》.2019,第12卷(第1期),全文.

丁乙,等. “一种新脆性评价方法的构建及应用”.《CPS/SEG北京2018国际地球物理会议暨展览电子论文集》.2018,全文.

赵金洲,等. “页岩气储层可压性评价新方法”.《天然气地球科学》.2015,第26卷(第6期),全文.

1. 一种层理性页岩地层可压性指数预测方法,其特征在于:包括:

获取页岩地层的多个影响因素,所述多个影响因素包括页岩层理发育特征参数、层理力学参数、基体力学参数及页岩地层应力状态参数;

将所述多个影响因素中的每个影响因素进行归一化处理,得到所述每个影响因素的归一化值;

基于数值模拟方法和所述多个影响因素,获得所述多个影响因素中每个影响因素的权重系数;

基于预设公式、所述每个影响因素的归一化值以及所述每个影响因素的权重系数,获得所述页岩地层的可压性指数值;

所述权重系数的计算方法包括以下步骤:

S1,根据所述多个影响因素,采用岩石破坏模拟软件,构建出具有层理结构的页岩地层压裂模型;

S2,基于所述页岩地层压裂模型,开展所述多个影响因素协同影响下的压裂缝扩展数值模拟;

S3,基于数值模拟结果,采用二值化处理手段,确定不同压裂条件下的压裂缝无因次面积;

S4,基于压裂缝无因次面积,通过所述多个影响因素的变化幅值与对应的无因次面积变化幅值,确定所述多个影响因素对压裂缝无因次面积的影响程度系数;

S5,基于所述多个影响因素的影响程度系数与总影响程度系数的比值,确定所述多个影响因素中每个影响因素对可压性的权重系数;

所述预设公式如下:

$$F_{index} = \sum_{k=1}^n \psi[X(k)] S(k)$$

式中, F_{index} —可压性指数; $S(k)$ —第k项影响因素的归一化值, $\psi[X(k)]$ —第k项影响因素的权重系数。

2. 根据权利要求1所述的一种层理性页岩地层可压性指数预测方法,其特征在于:所述层理力学参数包括层理抗压强度、层理弹性模量、层理泊松比、层理脆性、层理内摩擦角、层理抗张强度;

所述基体力学参数包括基体抗压强度、基体弹性模量、基体泊松比、基体脆性、基体内摩擦角、基体抗张强度。

3. 根据权利要求1所述的一种层理性页岩地层可压性指数预测方法,其特征在于:页岩地层应力状态参数包括水平地应力、地应力差、孔隙压力。

4. 根据权利要求1所述的一种层理性页岩地层可压性指数预测方法,其特征在于:页岩层理发育特征参数包括层理密度和层理角度。

5. 根据权利要求1或2所述的一种层理性页岩地层可压性指数预测方法,其特征在于:

对页岩岩样的基体和层理进行力学测试,获得所述的页岩基体力学参数与页岩层理力学参数;

对页岩岩样进行观测,获得页岩层理面发育密度。

6. 根据权利要求5所述的一种层理性页岩地层可压性指数预测方法,其特征在於:所述页岩岩样有两种:页岩标准圆柱岩心和短圆柱岩心;

标准圆柱岩心具有层理角度 0° 、 45° 、 90° ;

短圆柱岩心具有层理角度 0° 与 90° 。

7. 根据权利要求1、2、3或4所述的一种层理性页岩地层可压性指数预测方法,其特征在於:

压裂缝无因次面积的计算公式如下:

$$A = \frac{N(\text{pix} = 1)}{N(\text{pix} = 0) + N(\text{pix} = 1)}$$

式中,A—压裂缝无因次面积,N(pix=0)—像素点为0的数量,N(pix=1)—像素点为1的数量;

各影响因素的影响程度系数的计算公式如下:

$$\eta(k) = \frac{|A[X(k)_{\max}] - A[X(k)_{\min}]| / A[X(k)_{\min}]}{|X(k)_{\max} - X(k)_{\min}| / X(k)_{\min}} \quad k = 1, 2, 3, \dots, n$$

式中, $\eta(k)$ —第k项影响因素的影响程度系数; $X(k)_{\max}$ 、 $X(k)_{\min}$ —分别为第k项影响因素的最大值与最小值; $A[X(k)_{\max}]$ 、 $A[X(k)_{\min}]$ —分别为第k项影响因素的最大值与最小值对应的压裂缝无因次面积;

权重系数的计算公式如下:

$$\psi[X(k)] = \frac{\eta(k)}{\sum_{k=1}^{k=n} \eta(k)} \quad k = 1, 2, 3, \dots, n$$

式中, $\psi[X(k)]$ —第k项影响因素的权重系数。

8. 根据权利要求1所述的一种层理性页岩地层可压性指数预测方法,其特征在於:

采用以下公式对各影响因素进行归一化处理:

$$\begin{cases} S(k) = \frac{X(k) - X(k)_{\min}}{X(k)_{\max} - X(k)_{\min}} & \text{正相关} \\ S(k) = \frac{X(k)_{\max} - X(k)}{X(k)_{\max} - X(k)_{\min}} & \text{负相关} \end{cases} \quad k = 1, 2, 3, \dots, n$$

式中,S(k)—第k项影响因素的归一化值, $X(k)_{\max}$ 、 $X(k)_{\min}$ —分别为第k项影响因素的最大值与最小值; $X(k)$ 为第k项因素的数值。

一种层理性页岩地层可压性指数预测方法

技术领域

[0001] 本发明涉及页岩气勘探开发技术领域,尤其涉及层理性页岩地层可压性指数预测方法。

背景技术

[0002] 我国页岩气资源丰富,为应对我国对于天然气的强劲需求,加大页岩气勘探开发是我国石油工业的重要任务。水力压裂技术是目前页岩气的必须手段,压裂改造的效果与页岩气的产量直接相关。地层可压性评价方法是水力压裂技术的重要组成部分,也是整个水力压裂过程的基础。页岩地层的可压性是指:地层能够被水力压裂技术压开,形成有效增产的压裂缝网络。显然,可压性越好,有效压裂缝网越显著,压裂增产效果越好。

[0003] 目前,页岩地层可压性指数主要由两部分组成:页岩力学性质和页岩地层应力状态。基于页岩力学性质与页岩地层应力状态,通过实验测试结果、数值模拟结果、测井数据等资料,构建页岩可压性指数,对页岩地层可压性进行评价。

[0004] 现有页岩可压性指数预测方法的主要缺陷在于:忽略了页岩层理结构特征。根据目前石油工业对页岩地层的研究,页岩层理结构与压裂缝网密切相关。因此,层理特征对页岩地层可压性具有明显影响。

发明内容

[0005] 本申请为了解决上述技术问题提供层理性页岩地层可压性指数预测方法。

[0006] 本申请通过下述技术方案实现:

[0007] 层理性页岩地层可压性指数预测方法,包括:

[0008] 获取页岩地层的多个影响因素,所述多个影响因素包括页岩层理发育特征参数、层理力学参数、基体力学参数及页岩地层应力状态参数;

[0009] 将所述多个影响因素中的每个影响因素进行归一化处理,得到所述每个影响因素的归一化值;

[0010] 基于数值模拟方法和所述多个影响因素,获得所述多个影响因素中每个影响因素的权重系数;

[0011] 基于预设公式、所述每个影响因素的归一化值以及所述每个影响因素的权重系数,获得所述页岩地层的可压性指数值。

[0012] 优选地,所述层理力学参数包括层理抗压强度、层理弹性模量、层理泊松比、层理脆性、层理内摩擦角、层理抗张强度;

[0013] 所述基体力学参数包括基体抗压强度、基体弹性模量、基体泊松比、基体脆性、基体内摩擦角、基体抗张强度。

[0014] 优选地,页岩地层应力状态参数包括水平地应力、地应力差、孔隙压力。

[0015] 优选地,页岩层理发育特征参数包括层理密度和层理角度。

[0016] 其中,对页岩岩样的基体和层理进行力学测试,获得所述的页岩基体力学参数与

页岩层理力学参数；

[0017] 对页岩岩样进行观测,获得页岩层理面发育密度；

[0018] 进一步度,所述页岩岩样有两种:页岩标准圆柱岩心和短圆柱岩心；

[0019] 标准圆柱岩心具有层理角度 0° 、 45° 、 90° ；

[0020] 短圆柱岩心具有层理角度 0° 与 90° 。

[0021] 进一步的,权重系数的计算方法包括以下步骤：

[0022] S1,根据所述多个影响因素,采用岩石破坏模拟软件,构建出具有层理结构的页岩地层压裂模型；

[0023] S2,基于所述页岩地层压裂模型,开展所述多个影响因素协同影响下的压裂缝扩展数值模拟；

[0024] S3,基于数值模拟结果,采用二值化处理手段,确定不同压裂条件下的压裂缝无因次面积；

[0025] S4,基于压裂缝无因次面积,通过所述多个影响因素的变化幅值与对应的无因次面积变化幅值,确定所述多个影响因素对压裂缝无因次面积的影响程度系数；

[0026] S5,基于所述多个影响因素的影响程度系数与总影响程度系数的比值,确定所述多个影响因素中每个影响因素对可压性的权重系数。

[0027] 进一步的,压裂缝无因次面积的计算公式如下：

$$[0028] \quad A = \frac{N(\text{pix} = 1)}{N(\text{pix} = 0) + N(\text{pix} = 1)}$$

[0029] 式中,A—无因次压裂缝面积,N(pix=0)—像素点为0的数量,N(pix=1)—像素点为1的数量；

[0030] 各影响因素的影响程度系数的计算公式如下：

$$[0031] \quad \eta(k) = \frac{|A[X(k)_{\max}] - A[X(k)_{\min}]| / A[X(k)_{\min}]}{|X(k)_{\max} - X(k)_{\min}| / X(k)_{\min}} \quad k = 1, 2, 3, \dots, n$$

[0032] 式中, $\eta(k)$ —第k项影响因素的影响程度系数; $X(k)_{\max}$ 、 $X(k)_{\min}$ —分别为第k项影响因素的最大值与最小值; $A[X(k)_{\max}]$ 、 $A[X(k)_{\min}]$ —分别为第k项影响因素的最大值与最小值对应的无因次面积；

[0033] 权重系数的计算公式如下：

$$[0034] \quad \psi[X(k)] = \frac{\eta(k)}{\sum_{k=1}^{k=n} \eta(k)} \quad k = 1, 2, 3, \dots, n$$

[0035] 式中, $\psi[X(k)]$ —第k项影响因素的权重系数。

[0036] 进一步的,采用以下公式对各影响因素进行归一化处理：

$$[0037] \quad \begin{cases} S(k) = \frac{X(k) - X(k)_{\min}}{X(k)_{\max} - X(k)_{\min}} & \text{正相关} \\ S(k) = \frac{X(k)_{\max} - X(k)}{X(k)_{\max} - X(k)_{\min}} & \text{负相关} \end{cases} \quad k = 1, 2, 3, \dots, n$$

[0038] 式中, $S(k)$ —第 k 项影响因素的归一化值, $X(k)_{\max}$ 、 $X(k)_{\min}$ —分别为第 k 项影响因素的最大值与最小值; $X(k)$ 为第 k 项因素的数值。

[0039] 进一步的, 所述预设公式如下:

$$[0040] \quad F_{index} = \sum_{k=1}^n \psi[X(k)] S(k)$$

[0041] 式中, F_{index} —可压性指数; $S(k)$ —第 k 项影响因素的归一化值, $\psi[X(k)]$ —第 k 项影响因素的权重系数。

[0042] 与现有技术相比, 本申请具有以下有益效果:

[0043] 本发明将页岩分为基体与层理, 分别将层理参数(层理发育密度、层理方向、层理抗压强度、层理弹性模量、层理泊松比、层理脆性、层理抗张强度)与基体参数(基体抗压强度、基体弹性模量、基体泊松比、基体脆性、基体抗张强度)引入可压性评价, 形成了新的页岩地层可压性指数预测方法, 考虑因素全面, 具有较强的实用性。

附图说明

[0044] 此处所说明的附图用来提供对本说一实施方式的理解, 构成本申请的一部分, 并不构成对本发明实施方式的限定。

[0045] 图1是层理性页岩可压性指数预测方法的流程图;

[0046] 图2是获取页岩层理面与基体力学参数的实验方法示意图;

[0047] 图3是层理性页岩地层的压裂缝数值模拟示意图;

[0048] 图4是二值化处理获取无因次压裂缝面积的示意图;

[0049] 图5是各类影响因素的影响程度系数的排序图;

[0050] 图6是可压性指数预测结果图。

具体实施方式

[0051] 为使本申请的目的、技术方案和优点更加清楚, 下面将结合实施方式中的附图, 对本发明实施方式中的技术方案进行清楚、完整地描述。显然, 所描述的实施方式是本发明一部分实施方式, 而不是全部的实施方式。通常在此处附图中描述和示出的本发明实施方式的组件可以以各种不同的配置来布置和设计。

[0052] 因此, 以下对在附图中提供的本发明的实施方式的详细描述并非旨在限制要求保护的本发明的范围, 而是仅仅表示本发明的选定实施方式。基于本发明中的实施方式, 本领域普通技术人员在没有作出创造性劳动前提下所获得的所有其他实施方式, 都属于本发明保护的范围。

[0053] 如图1所示, 本实施例公开的层理性页岩的可压性指数预测方法, 包括以下步骤:

[0054] 步骤一、收集目标区块的钻井、地质资料, 可以统计得到工区页岩地层的应力状态分布, 包括: 垂向地应力、水平地应力及孔隙压力, 统计结果如表1所示:

[0055] 表1页岩地层应力分布范围

[0056]

应力状态	数值
垂向地应力	85MPa~110MPa

水平地应力	72MPa~101MPa
孔隙压力	45MPa~65MPa

[0057] 步骤二、制备岩样。

[0058] 通过钻机对页岩露头进行钻取岩样,因设备的限制,抗张强度的实验设备只能用短岩芯。因而本实施例制备了两种岩芯:分别为标准圆柱岩心(25mm直径,50mm长度)和短圆柱岩心(25mm直径,25mm长度)。其中,标准圆柱岩心具有层理角度 0° 、 45° 、 90° ;短圆柱岩心具有层理角度 0° 与 90° 。

[0059] 步骤三、采用页岩标准圆柱岩心和短圆柱岩心,分别开展单轴压缩实验、巴西劈裂实验及直剪实验,获取页岩基体力学参数与页岩层理力学参数。本实施例中的力学参数包括:弹性模量、泊松比、抗压强度、内摩擦角、抗张强度、脆性指数;实验示意图如图2所示。

[0060] 根据单一弱面准则,页岩单轴压缩过程中,低或高层理角度(0° 和 90°),页岩沿基体破坏,可获得页岩基体的单轴抗压强度、弹性模量、泊松比及脆性;中部层理角度(45°),页岩沿层理面破坏,可获得层理面的单轴抗压强度、弹性模量、泊松比及脆性。

[0061] 其中,单轴抗压强度是单轴压缩实验中的峰值强度点的数值。弹性模量与泊松比则通过单轴压缩实验曲线的弹性段曲线求取,计算公式如下:

$$[0062] \quad \begin{cases} E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \\ \mu = \left| \frac{\varepsilon_r}{\varepsilon_a} \right| \end{cases}$$

[0063] 式中, E —弹性模量, μ —泊松比, $\Delta\sigma$ —弹性阶段轴向应力差值, $\Delta\varepsilon$ —弹性阶段轴向应变差值, ε_r —径向形变, ε_a —轴向形变。

[0064] 脆性指数采用Rickman定律,通过弹性模量与泊松比计算,计算公式如下:

$$[0065] \quad \begin{cases} B_1 = \frac{E - E_{\min}}{E_{\max} - E_{\min}} \\ B_2 = \frac{\mu_{\max} - \mu}{\mu_{\max} - \mu_{\min}} \\ BI = \frac{B_1 + B_2}{2} \end{cases}$$

[0066] 式中, BI —脆性指数, E_{\min} 、 E_{\max} —最大和最小弹性模量, μ_{\min} 、 μ_{\max} —最大和最小泊松比。

[0067] 根据巴西劈裂实验原理,层理角度 0° 时,页岩沿基体张性破裂,可获得基体抗张强度;层理角度为 90° 时,页岩沿层理张性破裂,可获得层理抗张强度。基于巴西劈裂实验得到的应力曲线,计算抗张强度的公式如下:

$$[0068] \quad \sigma_t = \frac{2P_{\max}}{\pi dw}$$

[0069] 式中, σ_t —抗张强度, P_{\max} —最大轴向应力, d —岩样直径; w —岩样厚度。

[0070] 通过沿层理面和沿基体的直剪实验,基于岩石剪切破坏准则,获得页岩基体与层理面的内摩擦角。基于直剪实验得到的应力曲线,计算内摩擦角的公式如下:

[0071] $\tau_f = C + \sigma_n \tan \phi$

[0072] 式中, τ_f —剪应力, C —内聚力, σ_n —正应力, ϕ —内摩擦角。

[0073] 力学测试的实验结果如表2所示:

[0074] 表2页岩基体和层理力学参数分布范围

	力学参数	数值	平均值
[0075] 页岩基体	弹性模量	12.2 GPa~44.5 GPa	28.4 GPa
	泊松比	0.20~0.28	0.24
	单轴抗压强度	76.6 MPa~102.8 MPa	89.7 MPa
	抗张强度	2.5 MPa~9.2 MPa	5.85 MPa
	脆性	0.46~0.78	0.62
	内摩擦角	24.1° ~31.2°	27.6°
页岩层理	弹性模量	6.8 GPa~26.3 GPa	16.5 GPa
	泊松比	0.24~0.33	0.28
	单轴抗压强度	45.6 MPa~71.2 MPa	58.4 MPa
	抗张强度	1.2 MPa~4.3 MPa	2.7 MPa
	脆性	0.26~0.48	0.37
	内摩擦角	14.1° ~19.6°	16.8°

[0076] 步骤四、通过对钻取的页岩岩心观测,统计层理发育密度。通过岩心长度与岩心层理总数,得到页岩层理发育密度,采用以下公式计算页岩层理发育密度:

[0077]
$$D_d = \frac{N_c}{L}$$

[0078] 式中, D_d —发育密度; N_c —层理总数; L —岩心长度。

[0079] 本实施方式统计多块页岩标准岩心的层理数量,得到工区页岩层理面发育密度分布在1000条/m~1500条/m。

[0080] 步骤五、基于室内实验结果与工区页岩地层应力状态,采用岩石破坏模拟软件(RFPA软件,也可以采用其他有限元数值模拟软件),构建了具有层理结构的页岩地层压裂模型,开展各种因素变化下的压裂缝数值模拟。

[0081] 数值模型示意图如图3所示。其中,本实施方式中,涉及影响因素包括:地应力大小、地应力差(垂向地应力与水平地应力差)、孔隙压力、层理角度、层理密度、层理抗压强度、层理弹性模量、层理泊松比、层理脆性、层理内摩擦角、层理抗张强度、基体抗压强度、基

体弹性模量、基体泊松比、基体脆性、基体内摩擦角、基体抗张强度。

[0082] 其中,模拟过程中,当模拟分析某一因素对压裂缝面积影响时,其他因素均固定为其平均值(如表2所示)。

[0083] 步骤六、基于数值模拟结果,采用二值化处理手段,获得数值模型的二值化图,如图4所示。基于二值化图片,黑色部分像素点为1,白色部分像素点为0,统计黑色部分(裂缝压开部分)像素点个数占总像素点的比例,得到压裂缝无因次面积,压裂缝无因次面积的计算公式如下:

$$[0084] \quad A = \frac{N(\text{pix} = 1)}{N(\text{pix} = 0) + N(\text{pix} = 1)}$$

[0085] 式中,A—无因次压裂缝面积,N(pix=0)—像素点为0的数量,N(pix=1)—像素点为1的数量。

[0086] 步骤七、通过各影响因素的变化幅度($|X(k)_{\max} - X(k)_{\min}| / X(k)_{\min}$)与对应的无因次面积变化幅度($|A[X(k)_{\max}] - A[X(k)_{\min}]| / A[X(k)_{\min}]$),确定各影响因素对压裂缝面积的影响程度系数,计算方程如下:

$$[0087] \quad \eta(k) = \frac{|A[X(k)_{\max}] - A[X(k)_{\min}]| / A[X(k)_{\min}]}{|X(k)_{\max} - X(k)_{\min}| / X(k)_{\min}} \quad k = 1, 2, 3, \dots, n$$

[0088] 式中, $\eta(k)$ —第k项影响因素的影响程度系数; $X(k)_{\max}$ 、 $X(k)_{\min}$ —分别为第k项影响因素的最大值与最小值,来源于如表2所示的力学测试的实验结果; $A[X(k)_{\max}]$ 、 $A[X(k)_{\min}]$ —分别为第k项影响因素的最大值与最小值对应的无因次面积。

[0089] 显然,影响程度系数越高,说明该影响因素对压裂缝无因次面积的影响越显著,代表对页岩可压性的影响更明显,整体排序如图5所示。

[0090] 步骤八、根据各影响因素的影响程度系数与总影响程度系数的比值,确定各因素对可压性的权重系数,从而形成可压性指数,对页岩地层可压性进行评价。

[0091] 其中,可压性的权重系数计算表达式如下:

$$[0092] \quad \psi[X(k)] = \frac{\eta(k)}{\sum_{k=1}^{k=n} \eta(k)} \quad k = 1, 2, 3, \dots, n$$

[0093] 式中, $\psi[X(k)]$ —第k项影响因素的权重系数。

[0094] 在此基础上,对各影响因素进行归一化处理,公式如下:

$$[0095] \quad \begin{cases} S(k) = \frac{X(k) - X(k)_{\min}}{X(k)_{\max} - X(k)_{\min}} & \text{正相关} \\ S(k) = \frac{X(k)_{\max} - X(k)}{X(k)_{\max} - X(k)_{\min}} & \text{负相关} \end{cases} \quad k = 1, 2, 3, \dots, n$$

[0096] 式中,S(k)—第k项影响因素的归一化值,X(k)为第k项因素的数值,X(k)来源于如表2所示的力学测试的实验结果。

[0097] 归一化处理的目的是将表2里的所有参数(地应力、孔隙压力、层理强度等)的分布范围全部统一归到0-1范围。

[0098] 基于上述公式,当该影响因素与压裂缝面积呈正相关时, $X(k)$ 取最大值, $S(k)$ 为1; $X(k)$ 取最小值, $S(k)$ 为0。

[0099] 当该影响因素与压裂缝面积呈负相关时候,当 $X(k)$ 取最大值, $S(k)$ 为0;当 $X(k)$ 取最小值, $S(k)$ 为1。

[0100] 结合各影响因素的权重系数与归一化处理结果,基于如下的预设公式,获得可压性指数。

$$[0101] \quad F_{index} = \sum_{k=1}^n \psi[X(k)] S(k)$$

[0102] 式中, F_{index} —可压性指数; $S(k)$ —第 k 项影响因素的归一化值, $\psi[X(k)]$ —第 k 项影响因素的权重系数。

[0103] 因本实施例中影响因素包括地应力大小、地应力差、孔隙压力、层理角度、层理密度、层理抗压强度、层理弹性模量、层理泊松比、层理脆性、层理内摩擦角、层理抗张强度、基体抗压强度、基体弹性模量、基体泊松比、基体脆性、基体内摩擦角、基体抗张强度。所以可压性指数的计算方法为:

$$[0104] \quad F_{index} = 0.067BI_m + 0.067S_{tm} + 0.064\beta + 0.064S_{tb} + 0.062\sigma_{cm} + 0.062E_m + 0.062\varphi_m + 0.061\sigma_{in} + 0.058\varphi_b + 0.058\sigma_{cb} + 0.058D_e + 0.054\Delta\sigma_e + 0.054BI_b + 0.054\mu_m + 0.053P_p + 0.051E_b + 0.051\mu_b$$

[0105] 式中, F_{index} —可压性指数; BI_m —归一化后的基体脆性; S_{tm} —归一化后的基体抗张强度; β —归一化后的层理角度; S_{tb} —归一化后的层理抗张强度; σ_{cm} —归一化后的基体抗压强度; E_m —归一化后的基体弹性模量; φ_m —归一化后的基体内摩擦角; σ_{in} —归一化后的地应力数值; φ_b —归一化后的层理内摩擦角; σ_{cb} —归一化后的层理抗压强度; D_e —归一化后的层理发育密度; $\Delta\sigma_e$ —归一化后的地应力差; BI_b —归一化后的层理脆性; μ_m —归一化后的基体泊松比; P_p —归一化后的孔隙压力; E_b —归一化后的层理弹性模量; μ_b —归一化后的层理泊松比。

[0106] 基于上述可压性指数方程,对页岩地层可压性进行评价,如图6所示。根据本发明方法,能够得到地层可压性指数分布。此外,该可压性指数与现场微地震体积具有良好的正相关性,说明了可压性指数越高,压裂缝体积越大,从而论证了本发明方法获得的可压性指数的准确性。

[0107] 本发明的预测方法基于数值模拟手段,将页岩基体与层理特征引入可压性评价,建立了适用于页岩地层的可压性评价方法。

[0108] 以上所述的具体实施方式,对本申请的目的、技术方案和有益效果进行了进一步详细说明,所应理解的是,以上所述仅为本发明的具体实施方式而已,并不用于限定本发明的保护范围,凡在本发明的精神和原则之内,所做的任何修改、等同替换、改进等,均应包含在本发明的保护范围之内。

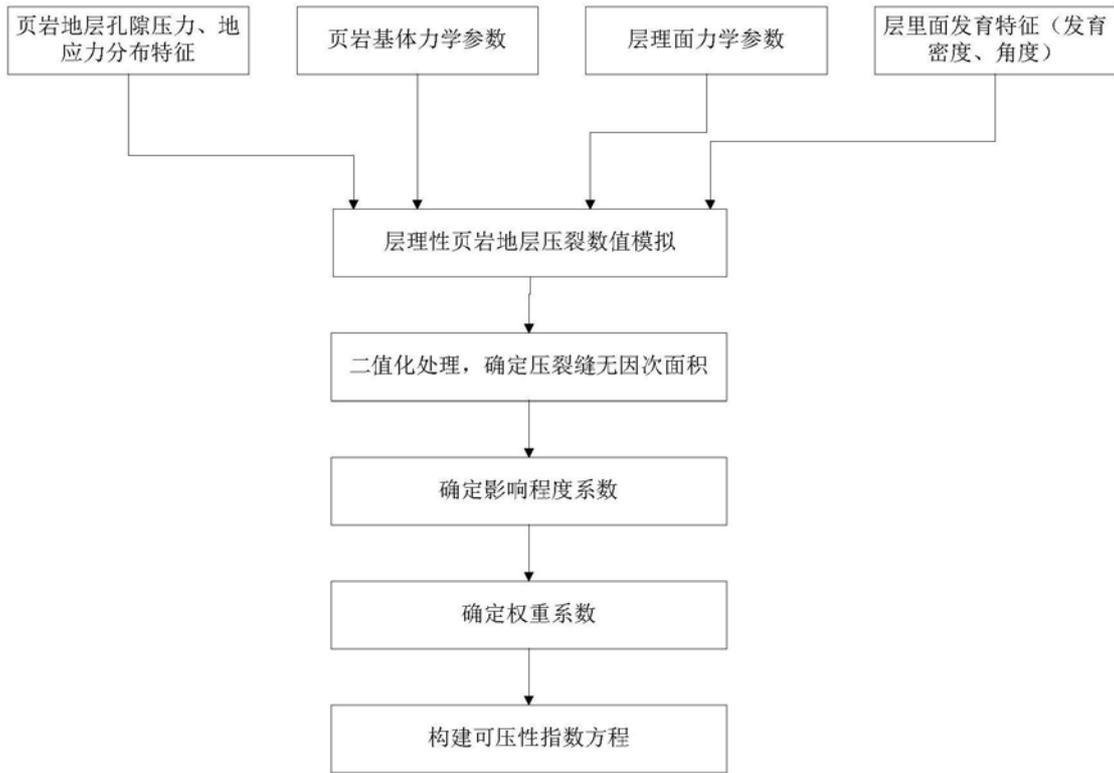


图1

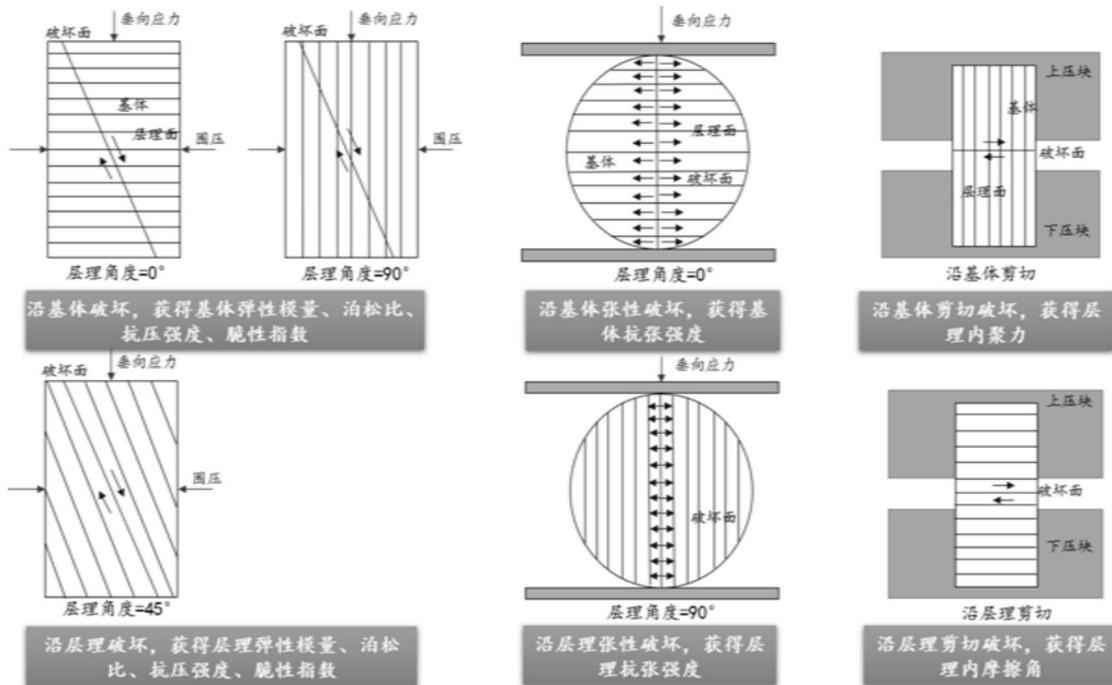


图2

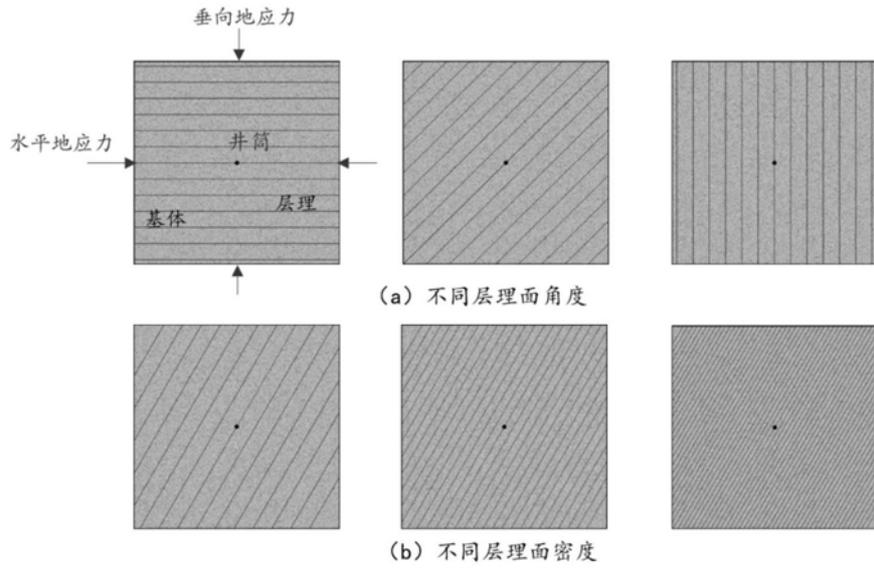


图3

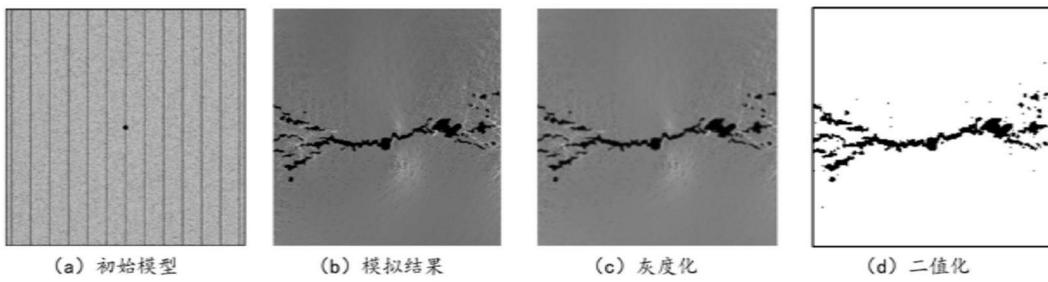


图4

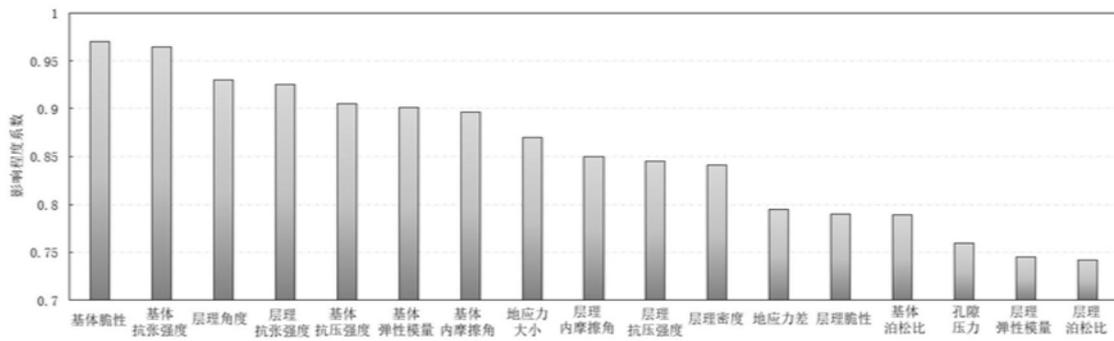
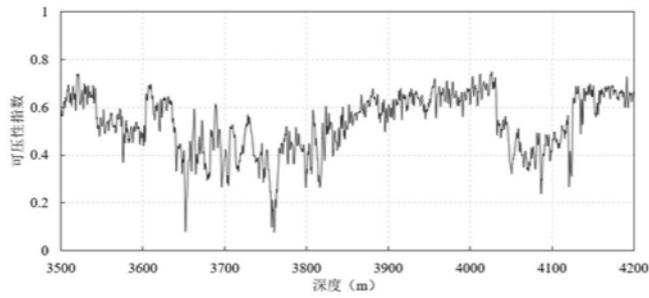
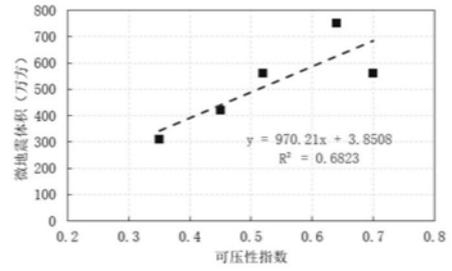


图5



(a) 可压性指数分布



(b) 可压性指数与微地震体积相关性

图6