(19) 国家知识产权局



(12)发明专利申请



(10)申请公布号 CN 114488302 A (43)申请公布日 2022.05.13

- (21)申请号 202210085506.1
- (22)申请日 2022.01.25
- (71)申请人 中南大学 地址 410083 湖南省长沙市岳麓区麓山南 路932号
- (72) 发明人 潘新朋 刘志顺 刘嘉玮 王镤 张鹏飞 柳建新
- (74) 专利代理机构 济南圣达知识产权代理有限 公司 37221

专利代理师 杨琪

(51) Int.CI. GO1V 1/30 (2006.01)

(54) 发明名称

一种原位各向异性地应力场预测方法及系 统

(57)摘要

本发明提供了一种原位各向异性地应力场 预测方法及系统,包括:获取不同方位角和入射 角下的地震子波,并与PP波反射系数进行褶积, 得到合成地震数据;利用合成地震数据中的宽方 位地震数据,基于零阶和二阶傅里叶系数进行地 震反演,得到各向同性背景弹性参数和裂缝弱度 参数;基于各向同性背景弹性参数和裂缝弱度参 数,计算得到最小水平主应力和最大水平主应 力。有效得到了复杂裂缝性多孔储层的各向异性 地应力。 X_{2} $P_{p} \sigma_{1} (or \sigma_{33})$ X_{1} X_{3} $\sigma_{H} (or \sigma_{22})$

权利要求书1页 说明书9页 附图11页

CN 114488302 A

1.一种原位各向异性地应力场预测方法,其特征在于,包括:

获取不同方位角和入射角下的地震子波,并与PP波反射系数进行褶积,得到合成地震数据;

利用合成地震数据中的宽方位地震数据,基于零阶和二阶傅里叶系数进行地震反演, 得到各向同性背景弹性参数和裂缝弱度参数;

基于各向同性背景弹性参数和裂缝弱度参数,计算得到最小水平主应力和最大水平主 应力。

2.如权利要求1所述的一种原位各向异性地应力场预测方法,其特征在于,所述PP波反射系数与纵波模量和横波模量、流体模量、孔隙相关应力参数、法向裂缝弱度和切向裂缝弱 度相关。

3.如权利要求1所述的一种原位各向异性地应力场预测方法,其特征在于,所述各向同 性背景弹性参数包括流体模量、孔隙度相关应力参数、流体模量与密度的乘积、纵波模量和 横波模量。

4.如权利要求1所述的一种原位各向异性地应力场预测方法,其特征在于,所述裂缝弱度包括法向裂缝弱度和切向裂缝弱度。

5.如权利要求1所述的一种原位各向异性地应力场预测方法,其特征在于,所述最小水 平主应力由有效弹性刚度系数、最小水平方向有效应力系数、垂直方向有效应力系数、最小 水平主应变、最大水平主应变、垂直应力和孔隙流体压力表示。

6.如权利要求1所述的一种原位各向异性地应力场预测方法,其特征在于,所述最大水 平主应力由有效弹性刚度系数、最大水平方向有效应力系数、垂直方向有效应力系数、最小 水平主应变、最大水平主应变、垂直应力和孔隙流体压力表示。

7.如权利要求6所述的一种原位各向异性地应力场预测方法,其特征在于,所述最小水 平方向有效应力系数和最大水平方向有效应力系数均与P波模量、法向裂缝弱度和有效体 积模量相关。

8.一种原位各向异性地应力场预测系统,其特征在于,包括:

褶积模块,其被配置为:获取不同方位角和入射角下的地震子波,并与PP波反射系数进行褶积,得到合成地震数据;

反演模块,其被配置为:利用合成地震数据中的宽方位地震数据,基于零阶和二阶傅里 叶系数进行地震反演,得到各向同性背景弹性参数和裂缝弱度参数;

最小和最大水平主应力计算模块,其被配置为:基于各向同性背景弹性参数和裂缝弱 度参数,计算得到最小水平主应力和最大水平主应力。

9.一种计算机可读存储介质,其上存储有计算机程序,其特征在于,该程序被处理器执 行时实现如权利要求1-7中任一项所述的一种原位各向异性地应力场预测方法中的步骤。

10.一种计算机设备,包括存储器、处理器及存储在存储器上并可在处理器上运行的计算机程序,其特征在于,所述处理器执行所述程序时实现如权利要求1-7中任一项所述的一种原位各向异性地应力场预测方法中的步骤。

一种原位各向异性地应力场预测方法及系统

技术领域

[0001] 本发明属于应力场预测技术领域,尤其涉及一种原位各向异性地应力场预测方法 及系统。

背景技术

[0002] 本部分的陈述仅仅是提供了与本发明相关的背景技术信息,不必然构成在先技术。

[0003] 发育一组垂直或近似垂直的定向排列裂缝的非常规页岩通常具有水平对称的横向各向同性(HTI)。与常规各向同性岩石相比,振幅随偏移距变化(AVO)的地震响应受发育的裂缝和各向异性地应力的影响,因此,在生产中优化水力压裂需要了解裂缝性质和各向异性地应力。然而,因为裂缝的存在估算各向异性地应力比较困难。

发明内容

[0004] 为了解决上述背景技术中存在的技术问题,本发明提供一种原位各向异性地应力场预测方法及系统,有效得到了复杂裂缝性多孔储层的各向异性地应力。

[0005] 为了实现上述目的,本发明采用如下技术方案:

[0006] 本发明的第一个方面提供一种原位各向异性地应力场预测方法,其包括:

[0007] 获取不同方位角和入射角下的地震子波,并与PP波反射系数进行褶积,得到合成 地震数据;

[0008] 利用合成地震数据中的宽方位地震数据,基于零阶和二阶傅里叶系数进行地震反演,得到各向同性背景弹性参数和裂缝弱度参数;

[0009] 基于各向同性背景弹性参数和裂缝弱度参数,计算得到最小水平主应力和最大水平主应力。

[0010] 进一步的,所述PP波反射系数与纵波模量和横波模量、流体模量、孔隙相关应力参数、法向裂缝弱度和切向裂缝弱度相关。

[0011] 进一步的,所述各向同性背景弹性参数包括流体模量、孔隙度相关应力参数、流体 模量与密度的乘积、纵波模量和横波模量。

[0012] 进一步的,所述裂缝弱度包括法向裂缝弱度和切向裂缝弱度。

[0013] 进一步的,所述最小水平主应力由有效弹性刚度系数、最小水平方向有效应力系数、垂直方向有效应力系数、最小水平主应变、最大水平主应变、垂直应力和孔隙流体压力 表示。

[0014] 进一步的,所述最大水平主应力由有效弹性刚度系数、最大水平方向有效应力系数、垂直方向有效应力系数、最小水平主应变、最大水平主应变、垂直应力和孔隙流体压力 表示。

[0015] 进一步的,所述最小水平方向有效应力系数和最大水平方向有效应力系数均与P 波模量、法向裂缝弱度和有效体积模量相关。

[0016] 本发明的第二个方面提供一种原位各向异性地应力场预测系统,其包括:

[0017] 褶积模块,其被配置为:获取不同方位角和入射角下的地震子波,并与PP波反射系数进行褶积,得到合成地震数据;

[0018] 反演模块,其被配置为:利用合成地震数据中的宽方位地震数据,基于零阶和二阶 傅里叶系数进行地震反演,得到各向同性背景弹性参数和裂缝弱度参数;

[0019] 最小和最大水平主应力计算模块,其被配置为:基于各向同性背景弹性参数和裂缝弱度参数,计算得到最小水平主应力和最大水平主应力。

[0020] 本发明的第三个方面提供一种计算机可读存储介质,其上存储有计算机程序,该程序被处理器执行时实现如上述所述的一种原位各向异性地应力场预测方法中的步骤。

[0021] 本发明的第四个方面提供一种计算机设备,包括存储器、处理器及存储在存储器 上并可在处理器上运行的计算机程序,所述处理器执行所述程序时实现如上述所述的一种 原位各向异性地应力场预测方法中的步骤。

[0022] 与现有技术相比,本发明的有益效果是:

[0023] 本发明提供了一种原位各向异性地应力场预测方法,其利用线性滑移模型和散射 函数推导了用孔隙度相关应力参数和裂缝参数表示的线性化PP波反射系数,利用贝叶斯地 震方位傅里叶系数反演方法计算了孔隙度相关应力参数和裂缝弱度,并计算了最小水平主 应力和最大水平主应力,有效得到了复杂裂缝性多孔储层的各向异性地应力。

附图说明

[0024] 构成本发明的一部分的说明书附图用来提供对本发明的进一步理解,本发明的示意性实施例及其说明用于解释本发明,并不构成对本发明的不当限定。

[0025] 图1是本发明实施例一的均匀各向同性背景下单组定向、垂直裂缝形成的HTI介质的地应力模型示意图;

[0026] 图2(a) 是本发明实施例一的无噪声下四个方位角的合成角度道集;

[0027] 图2(b)是本发明实施例一的信噪比SNR为2下四个方位角的合成角度道集;

[0028] 图3(a)是本发明实施例一的无噪声数据计算的流体模量、孔隙度相关的应力参数、流体模量与密度的乘积、P波和S波模量结果图;

[0029] 图3(b)是本发明实施例一的无噪声数据计算的法向和切向裂缝弱度、最小和最大 水平主应力结果图;

[0030] 图4(a) 是本发明实施例一的有噪声数据计算的流体模量、孔隙度相关的应力参数、流体模量与密度的乘积、P波和S波模量结果图;

[0031] 图4 (b) 是本发明实施例一的有噪声数据计算的法向和切向裂缝弱度、最小和最大水平主应力结果图;

[0032] 图5(a)是本发明实施例一的经处理的第一方位角的地震数据剖面;

[0033] 图5(b)是本发明实施例一的经处理的第二方位角的地震数据剖面;

[0034] 图5(c)是本发明实施例一的经处理的第三方位角的地震数据剖面;

[0035] 图5(d)是本发明实施例一的经处理的第四方位角的地震数据剖面;

[0036] 图6(a) 是本发明实施例一的计算的实际数据的流体模量结果图;

[0037] 图6(b)是本发明实施例一的计算的实际数据的孔隙相关应力参数结果图;

[0038] 图6(c)是本发明实施例一的计算的实际数据的流体模量与密度的乘积结果图;

[0039] 图6(d)是本发明实施例一的计算的实际数据的P波模量结果图;

[0040] 图6(e)是本发明实施例一的计算的实际数据的S波模量结果图;

[0041] 图7(a)是本发明实施例一的计算的实际数据的法向裂缝弱度结果图;

[0042] 图7(b)是本发明实施例一的计算的实际数据的切向裂缝弱度结果图;

[0043] 图7(c)是本发明实施例一的计算的实际数据的最小水平主应力结果图;

[0044] 图7(d)是本发明实施例一的计算的实际数据的最大水平主应力结果图;

[0045] 图8(a) 是本发明实施例一的利用井位处的地震数据计算的流体模量、孔隙相关应力参数、流体模量与密度的乘积、P波和S波模量结果图;

[0046] 图8 (b) 是本发明实施例一的利用井位处的地震数据计算的法向和切向裂缝弱度、 最小和最大水平主应力结果图。

具体实施方式

[0047] 下面结合附图与实施例对本发明作进一步说明。

[0048] 应该指出,以下详细说明都是例示性的,旨在对本发明提供进一步的说明。除非另 有指明,本文使用的所有技术和科学术语具有与本发明所属技术领域的普通技术人员通常 理解的相同含义。

[0049] 需要注意的是,这里所使用的术语仅是为了描述具体实施方式,而非意图限制根据本发明的示例性实施方式。如在这里所使用的,除非上下文另外明确指出,否则单数形式也意图包括复数形式,此外,还应当理解的是,当在本说明书中使用术语"包含"和/或"包括"时,其指明存在特征、步骤、操作、器件、组件和/或它们的组合。

[0050] 实施例一

[0051] 本实施例提供了一种原位各向异性地应力场预测方法,在考虑孔隙压力、有效垂向应力和水平应力的情况下,在裂缝性孔隙介质中利用振幅随偏移距和方位角变化 (AVOAz)重建各向异性地应力场。结合有效应力定律和各向异性Gassmann方程,基于线性滑移理论推导了含流体模量、孔隙度、各向同性背景岩有效应力系数、法向和切向弱度的流体 饱和有效弹性刚度矩阵。采用渐近线理论和平稳相位法,推导出线性化的PP波反射系数函数,其与纵波和横波模量、流体模量、孔隙相关应力参数和两个裂缝弱度相关,可用于计算最小和最大水平主应力、垂直主应力和孔隙压力。根据贝叶斯理论,基于模型参数的后验概率密度函数,以方位傅里叶系数为函数计算了孔隙相关应力参数和和裂缝弱度。最后用计算的弹性模量、孔隙相关应力参数、由主应力的逆和孔隙压力乘以有效应力系数得到的裂 缝弱度计算出了有效的水平和垂直应力。

[0052] 步骤1、获取不同方位角和入射角下的地震子波,并与PP波反射系数进行褶积,得到合成地震数据。

[0053] 本发明采用渐近线理论和平稳相位法,推导了线性化的PP波反射系数函数,其与 纵波 (P波) 模量M和横波 (S波) 模量 μ 、流体模量 K_f 、孔隙相关应力参数 σ_V^{ϕ} 和两个裂缝弱度 (法向裂缝弱度 δ_N 和切向裂缝弱度 δ_T)相关,可用于计算最小和最大水平主应力、垂直主应力 和孔隙压力。

[0054] 在各向异性介质中,基于渐近射线理论和平稳相位法,可以研究散射函数与PP波 反射系数之间的关系,推导出HTI介质中用敏感应力参数和裂缝弱度表示的反射系数:

$$R_{PP}^{HTI}(\theta,\varphi) = a_{K_{f}}(\theta)\frac{\Delta K_{f}}{K_{f}} + a_{\sigma_{V}^{\phi}}(\theta)\frac{\Delta \sigma_{V}^{\phi}}{\sigma_{V}^{\phi}} + a_{\rho K_{f}}(\theta)\frac{\Delta(\rho K_{f})}{\rho K_{f}} + a_{M}(\theta)\frac{\Delta M}{M} + a_{\mu}(\theta)\frac{\Delta\mu}{\mu} + a_{\delta_{N}}(\theta,\varphi)\Delta\delta_{N} + a_{\delta_{T}}(\theta,\varphi)\Delta\delta_{T}$$

$$(1)$$

[0056] 其中, θ 和 φ 分别表示地震波入射角和方位角, ρ 表示密度,

$$[0057] \quad a_{K_f}(\theta) = \frac{1}{4\cos^2\theta} \left(2\sin^2\theta - \frac{\gamma^2}{\gamma_{sat}^2} \right)$$
(2a)

$$[0058] \quad a_{\sigma_{\nu}^{\phi}}(\theta) = \frac{1}{4\cos^{2}\theta} \left(1 - \frac{\gamma^{2}}{\gamma_{sat}^{2}}\right)$$
(2b)

[0059]
$$a_{\rho K_f}(\theta) = \frac{1}{2} - \frac{1}{4\cos^2 \theta}$$
 (2c)

$$[0060] \quad a_M(\theta) = \frac{\gamma^2}{\gamma_{sat}^2} \frac{1}{4\cos^2 \theta}$$
(2d)

$$\begin{bmatrix} 0061 \end{bmatrix} \quad a_{\mu}(\theta) = -\frac{2}{\gamma_{sat}^2} \sin^2 \theta \tag{2e}$$

$$\begin{bmatrix} 0062 \end{bmatrix} \quad a_{\delta_N}\left(\theta,\varphi\right) = -\frac{\gamma^2}{\gamma_{sat}^2} \frac{1}{4\cos^2\theta} \left(1 - \frac{2}{\gamma_{sat}^2} \left(\sin^2\theta \sin^2\varphi + \cos^2\theta\right)\right)^2 \tag{2f}$$

$$\begin{bmatrix} 0063 \end{bmatrix} \quad a_{\delta_T}(\theta,\varphi) = \frac{1}{\gamma_{sat}^2} \sin^2 \theta \cos^2 \varphi \left(1 - \tan^2 \theta \sin^2 \varphi\right)$$
(2g)

[0064] 其中, $\gamma^2 = M/\mu \eta \gamma_{sat}^2 = M_{sat}/\mu$ 分别代表干岩石、饱和流体岩石的P-S波模量比。 [0065] 步骤2、利用合成地震数据中的宽方位地震数据,基于零阶和二阶傅里叶系数进行 地震反演,得到各向同性背景弹性参数和裂缝弱度参数。即,基于零阶和二阶傅里叶系数对 孔隙度相关的应力参数和裂缝弱度参数进行地震反演,具体的,根据贝叶斯理论,利用宽方 位地震数据反演了各向同性背景弹性参数(流体模量K_f、孔隙度相关的应力参数 σ_V^{ϕ} 、流体 模量与密度的乘积 ρ K_f、P波模量M、S波模量 μ)和裂缝弱度(法向裂缝弱度 δ_N 和切向裂缝弱度 δ_T)。

[0066] 遵循贝叶斯规则,模型参数的后验分布p(m|d)依赖于先验模型p(m)和通过似然函数p(d|m)得到的数据向量d(包括噪声):

[0067]
$$p(m|d) \propto p(m) p(d|m)$$
 (3)
[0068] 其中, $m = \left[K_f, \sigma_V^{\phi}, \rho K_f, M, \mu, \delta_N, \delta_T\right]^T$ 表示模型向量; $p(d|m)$ 通常以指数形式依赖

于某一范数中的数据不拟合(这里,假设P=2,并且数据不拟合符合高斯分布);G是从模型 参数到观测数据的映射算子,可以表示为

$$[0069] G = W \Phi D$$
 (4)

[0070] 其中,W表示小波矩阵, Φ表示Fréchet导数相对于计算的模型参数m的灵敏度矩 阵,D表示相邻层中模型参数的微分算符。根据Tarantola的逆理论,模型参数可以计算如下

$$\boldsymbol{m} = \left(\boldsymbol{G}^{T}\boldsymbol{C}_{d}^{-1}\boldsymbol{G} + \boldsymbol{C}_{m}^{-1}\right)^{-1} \left(\boldsymbol{G}^{T}\boldsymbol{C}_{d}^{-1}\boldsymbol{d} + \boldsymbol{C}_{m}^{-1}\boldsymbol{m}_{ref}\right)$$
$$= \boldsymbol{m}_{ref} + \boldsymbol{C}_{m}\boldsymbol{G}^{T} \left(\boldsymbol{G}\boldsymbol{C}_{m}\boldsymbol{G}^{T} + \boldsymbol{C}_{d}\right)^{-1} \left(\boldsymbol{d} - \boldsymbol{G}\boldsymbol{m}_{ref}\right)$$
(5)

[0071]

[0074] 本发明结合有效应力定律和各向异性Gassmann方程,基于线性滑移理论推导了含流体模量、孔隙度、各向同性背景岩有效应力系数、法向和切向弱度的流体饱和有效弹性刚度矩阵。

[0075] 生产过程中孔隙压力的变化会引起地应力的变化,地应力可以通过各向异性孔隙 弹性方程来计算。因此,在线性弹性的流体饱和各向异性岩石中应力张量(o_{ij})、应变张量 (ε_{ii})和孔隙压力(P_n)之间的关系(被称为一般有效应力定律)可以表示为:

$$[0076] \quad \boldsymbol{\sigma}_{ij}^{eff} = \boldsymbol{\sigma}_{ij} - \boldsymbol{\alpha}_{ij} P_p \boldsymbol{\delta}_{ij} = C_{ijkl} \boldsymbol{\varepsilon}_{kl} \tag{6}$$

[0077] 其中, σ_{ij}^{eff} 表示有效应力张量, σ_{ij} 和 ϵ_{kl} 分别表示岩石骨架的总应力张量和应变张量,P_p表示孔隙流体压力, δ_{ij} 表示克罗内克符号,另外,弹性常数张量 α_{ij} 表示有效应力系数,即提出的一个对称的二阶张量:

$$[0078] \quad \alpha_{ij} = \delta_{ij} - \frac{C_{ijkk}}{3K_{m}}$$

[0079] 其中,K_n表示各向同性背景岩石骨架中的有效体积模量,C_{ijkl}和C_{ijkk}均表示岩石骨 架的有效弹性刚度矩阵,其中,重复指数表示(i,j,k,1=1,2,3)Einstein求和法;

(7)

[0080] 对于HTI介质,弹性刚度系数与法向裂缝弱度、切向裂缝弱度和纵波模量相关,6×6的弹性刚度矩阵可以写成如下形式:

[0081]	<i>C</i> _{<i>HTI</i>} =	$M(1-\delta_N)$	$\lambda(1-\delta_{_N})$	$\lambda(1-\delta_{_N})$	0	0	0]	
		$\lambda(1 - \delta_{_N})$	$M\left(1-\chi^2\delta_N\right)$	$\lambda(1-\chi\delta_{N})$	0	0	0	(8)
		$\lambda(1-\delta_{_N})$	$\lambda(1-\chi\delta_{_N})$	$M\left(1-\chi^2\delta_N\right)$	0	0	0	
		0	0	0	μ	0	0	
		0	0	0	0	$\mu(1-\delta_T)$	0	
		0	0	0	0	0	$\mu(1-\delta_T)$	

[0082] 其中,λ和μ表示干(或气饱和)各向同性背景岩的第一和第二Lamé系数(也称为横 波模量或剪切模量或第二拉梅系数),M=λ+2μ表示纵波(或压缩或P波)模量,x=λ/M表示模 量比;δ_N和δ_r分别表示二维法向和切向裂缝弱度,其与法向和切向裂缝柔度Z_N、Z_r有关。

[0083] 如图1所示,二阶应力张量 σ_{ij} 和二阶应变张量 ϵ_{ij} 可以写成三个主应力(σ_{11} 、 σ_{22} 和 σ_{33})和三个主应变(ϵ_{11} 、 ϵ_{22} 和 ϵ_{33})以及用来定义三个主应力或主应变的三个角度;用符号h、H和V来替换 X_1 、 X_2 和 X_3 三个坐标轴,并且假设三个主轴 X_1 、 X_2 和 X_3 和三个主应力 σ_h 、 σ_H 和 σ_v 以及三个主应变 ϵ_h 、 ϵ_H 和 ϵ_v 对齐。

[0084] 如图1所示,X₃坐标轴是垂直方向,HTI介质中的最小和最大水平主应力o_h和o_H可由 最小和最大水平主应变ε_h和ε_H、垂直应力o_v和孔隙流体压力P_b表示:

$$[0085] \quad \sigma_h = \alpha_h P_p + \frac{C_{13}}{C_{33}} \left(\sigma_V - \alpha_V P_p \right) + \left(C_{11} - \frac{C_{13}^2}{C_{33}} \right) \mathcal{E}_h + \left(C_{13} - \frac{C_{13}C_{23}}{C_{33}} \right) \mathcal{E}_H$$
(9a)

$$[0086] \quad \sigma_{H} = \alpha_{H}P_{p} + \frac{C_{23}}{C_{33}} \left(\sigma_{V} - \alpha_{V}P_{p}\right) + \left(C_{13} - \frac{C_{13}C_{23}}{C_{33}}\right) \mathcal{E}_{h} + \left(C_{33} - \frac{C_{23}^{2}}{C_{33}}\right) \mathcal{E}_{H}$$
(9b)

[0087] 其中,C_{ij}表示有效的弹性刚度系数,其表达式见公式(8),C_{HTI}是由C₁₁、C₁₂、C₁₃、C₂₁、 C₂₂、C₂₃、C₃₁、C₃₂和C₃₃等元素组成的矩阵;最小水平方向有效应力系数和最大水平方向有效 应力系数均与P波模量、法向裂缝弱度和有效体积模量相关,a_h、a_H和a_v分别表示最小水平方 向、最大水平方向以及垂直方向的有效应力系数。

[0088]
$$\alpha_h = 1 - \frac{C_{11} + 2C_{13}}{3K_m} = 1 - \frac{(M + 2\lambda)(1 - \delta_N)}{3K_m}$$
 (10a)

$$[0089] \quad \alpha_{H} = \alpha_{V} = 1 - \frac{C_{13} + C_{23} + C_{33}}{3K_{m}} = 1 - \frac{M + 2\lambda - (1 + 2\chi)\lambda\delta_{N}}{3K_{m}}$$
(10b)

[0090] 垂直应力和垂直方向有效应力系数与孔隙度相关应力参数相关。当计算垂向应力 σ_v 时,垂向有效应力 σ_v^e 与页岩孔隙度 ϕ 的关系可以表示为:

$$[0091] \quad \phi = \phi_0 \exp\left[-\beta\sigma_V^e\right] = \phi_0 \exp\left[-\beta\left(\sigma_V - \alpha_V P_p\right)\right] = \phi_0 \sigma_V^\phi \tag{11}$$

[0092] 式中, $\sigma_{V}^{\phi} = \exp\left[-\beta\left(\sigma_{V} - \alpha_{V}P_{p}\right)\right]$ 表示与垂向应力相关的有效敏感参数(称 之为与孔隙度相关的垂向有效应力参数)、 β 表示经验参数; ϕ 是在孔隙度相关应力参数 σ_{V}^{ϕ}

下的页岩孔隙度、Φ。表示无应力下的页岩孔隙度。

因此,当得到孔隙度相关应力参数 σ_V^{ϕ} 时,可以计算流体孔隙压力: [0093]

$$[0094] \quad P_p = \frac{\ln \sigma_V^{\varphi}}{\beta \alpha_V} + \frac{\sigma_V}{\alpha_V}$$
(12)

[0095] 最后用计算的弹性模量和孔隙相关应力参数计算相应的孔隙压力,在此基础上进 一步计算出了有效的水平和垂直应力。

$$\sigma_{h} = \alpha_{h} \left(\frac{\ln \sigma_{V}^{\phi}}{\beta \alpha_{V}} + \frac{\sigma_{V}}{\alpha_{V}} \right) + \frac{\lambda(1 - \delta_{N})}{M(1 - \chi^{2}\delta_{N})} \left(\sigma_{V} - \alpha_{V} \left(\frac{\ln \sigma_{V}^{\phi}}{\beta \alpha_{V}} + \frac{\sigma_{V}}{\alpha_{V}} \right) \right) + \left(M(1 - \delta_{N}) - \frac{\lambda^{2}(1 - \delta_{N})^{2}}{M(1 - \chi^{2}\delta_{N})} \right) \varepsilon_{h} + \left(\lambda(1 - \delta_{N}) - \frac{\lambda^{2}(1 - \delta_{N})(1 - \chi\delta_{N})}{M(1 - \chi^{2}\delta_{N})} \right) \varepsilon_{H}$$

$$\sigma_{H} = \alpha_{H} \left(\frac{\ln \sigma_{V}^{\phi}}{\beta \alpha_{V}} + \frac{\sigma_{V}}{\alpha_{V}} \right) + \frac{\lambda(1 - \chi\delta_{N})}{M(1 - \chi^{2}\delta_{N})} \left(\sigma_{V} - \alpha_{V} \left(\frac{\ln \sigma_{V}^{\phi}}{\beta \alpha_{V}} + \frac{\sigma_{V}}{\alpha_{V}} \right) \right) + \left(\lambda(1 - \delta_{N}) - \frac{\lambda^{2}(1 - \chi\delta_{N})}{M(1 - \chi^{2}\delta_{N})} \right) \varepsilon_{h} + \left(\lambda(1 - \chi\delta_{N}) - \frac{\lambda^{2}(1 - \chi\delta_{N})^{2}}{M(1 - \chi^{2}\delta_{N})} \right) \varepsilon_{h} + \left(M(1 - \chi^{2}\delta_{N}) - \frac{\lambda^{2}(1 - \chi\delta_{N})^{2}}{M(1 - \chi^{2}\delta_{N})} \right) \varepsilon_{H}$$

$$(13a)$$

[009

[0098] 本实施例利用不同方位角的合成角度道集来证明本发明提出的反演方法的可行 性。首先,利用测井数据,将线性化的PP波反射系数与从方位角地震数据中提取的地震子波 进行褶积,生成合成数据。图2(a)表示没有任何噪声的合成地震数据。为了进一步证明所提 出的反演方法的稳定性,合成了噪音角度道集,图2(b)表示信噪比(SNR)为2的噪声地震数 据。基于零阶和二阶傅里叶系数对孔隙度相关的应力参数和裂缝弱度参数进行地震反演, 然后计算最小和最大水平地应力。计算结果如图3(a)、图3(b)、图4(a)和图4(b)所示,其中, 包含原始值、初始模型和计算结果。从反演结果来看,当地震数据不含噪声时,利用零阶傅 里叶系数可以很好地计算孔隙率相关的应力参数,利用二阶傅里叶系数也能准确地计算裂 缝弱度。当然,计算的最小和最大水平主应力与原始值吻合很好。相反,当地震数据包含一 定的中等噪声时,反演的各向同性背景弹性参数和裂缝弱度参数的精度小于无噪声数据, 但反演的模型参数可以满足计算最小水平主应力和最大水平主应力的实际需要。

本实施例利用一个来自中国四川盆地的真实的数据集进一步证明了本发明所提 [0099] 出的反演方法的稳定性。目的层属于构造复杂的裂缝性页岩气储层,由于垂直或近似垂直 裂缝的发育,岩石可以看成是具有HTI对称的气饱和裂缝性多孔介质。对所用的方位角地震 数据进行了处理,以保证可观测到的振幅数据能尽可能准确地显示地下界面的反射强度。 因此,经处理后的方位角地震振幅数据可用于表征裂缝性岩石的弹性和裂缝特性。图5(a)、 图5(b)、图5(c)和图5(d)分别表示以第一方位角20°、第二方位角65°、第三方位角110°和第 四方位角155°这四个方位角处理后的地震数据剖面,三个入射角分别为10°、20°和30°,其 中小黑色三角形符号表示所使用的井A的位置。

利用处理后的方位角地震数据,对背景弹性参数和裂缝参数进行地震反演,然后 [0100] 计算最小和最大水平主应力。目标位于白色虚点椭圆处,大约在1.91s~1.93s范围内。图6 (a)、图6(b)、图6(c)、图6(d)和图6(e)分别为计算的流体模量、孔隙相关应力参数、流体模

量与密度的乘积、P波和S波模量。图7(a)、图7(b)、图7(c)和图7(d)分别表示计算的法向和 切向裂缝弱度、最小和最大水平主应力。从反演结果中可以看出,仅利用计算的各向同性背 景弹性参数很难区分裂缝性多孔储层,但计算的裂缝参数在目标储层位置有明显的高值。 此外,计算的最小和最大水平主应力在目标储层位置有相对低值。

[0101] 为进一步验证计算的模型参数的稳定性,在图8(a)和图8(b)中比较了原始测井数据与计算值,结果表明计算的模型参数和真实值之间有很好的一致性,证明了由方位角地 震振幅数据计算各向异性地应力场的反演方法的可靠性。

[0102] 本发明主要从方位地震振幅数据中计算孔隙度相关应力参数和裂缝参数,并提出 了一种贝叶斯地震反演方法来表征具有HTI性质的裂缝性孔隙介质中的各向异性地应力。 为此,本发明基于有效应力定律引入了垂直应力、最小和最大水平主应力以及孔隙压力的 概念和理论。在假设弱各向异性和界面处弱对比的情况下,本发明利用线性滑移模型和散 射函数推导了用孔隙度相关应力参数和裂缝参数表示的线性化PP波反射系数。然后,本发 明利用贝叶斯地震方位傅里叶系数反演方法计算了孔隙度相关应力参数和裂缝弱度,并计 算了最小水平主应力和最大水平主应力。最后,用合成数据集和实际数据集验证了所提出 的反演方法的有效性,结果表明,在含气裂缝性多孔页岩储层中该反演方法可以有效计算 各向异性地应力。

[0103] 实施例二

[0104] 本实施例提供了一种原位各向异性地应力场预测系统,其具体包括如下模块:

[0105] 褶积模块,其被配置为:获取不同方位角和入射角下的地震子波,并与PP波反射系数进行褶积,得到合成地震数据;

[0106] 反演模块,其被配置为:利用合成地震数据中的宽方位地震数据,基于零阶和二阶 傅里叶系数进行地震反演,得到各向同性背景弹性参数和裂缝弱度参数;

[0107] 最小和最大水平主应力计算模块,其被配置为:基于各向同性背景弹性参数和裂缝弱度参数,计算得到最小水平主应力和最大水平主应力。

[0108] 此处需要说明的是,本实施例中的各个模块与实施例一中的各个步骤一一对应, 其具体实施过程相同,此处不再累述。

[0109] 实施例三

[0110] 本实施例提供了一种计算机可读存储介质,其上存储有计算机程序,该程序被处理器执行时实现如上述实施例一所述的一种原位各向异性地应力场预测方法中的步骤。

[0111] 实施例四

[0112] 本实施例提供了一种计算机设备,包括存储器、处理器及存储在存储器上并可在 处理器上运行的计算机程序,所述处理器执行所述程序时实现如上述实施例一所述的一种 原位各向异性地应力场预测方法中的步骤。

[0113] 本领域内的技术人员应明白,本发明的实施例可提供为方法、系统、或计算机程序 产品。因此,本发明可采用硬件实施例、软件实施例、或结合软件和硬件方面的实施例的形 式。而且,本发明可采用在一个或多个其中包含有计算机可用程序代码的计算机可用存储 介质(包括但不限于磁盘存储器和光学存储器等)上实施的计算机程序产品的形式。

[0114] 本发明是参照根据本发明实施例的方法、设备(系统)、和计算机程序产品的流程 图和/或方框图来描述的。应理解可由计算机程序指令实现流程图和/或方框图中的每一流

程和/或方框、以及流程图和/或方框图中的流程和/或方框的结合。可提供这些计算机程序 指令到通用计算机、专用计算机、嵌入式处理机或其他可编程数据处理设备的处理器以产 生一个机器,使得通过计算机或其他可编程数据处理设备的处理器执行的指令产生用于实 现在流程图一个流程或多个流程和/或方框图一个方框或多个方框中指定的功能的装置。 [0115] 这些计算机程序指令也可存储在能引导计算机或其他可编程数据处理设备以特 定方式工作的计算机可读存储器中,使得存储在该计算机可读存储器中的指令产生包括指 令装置的制造品,该指令装置实现在流程图一个流程或多个流程和/或方框图一个方框或 多个方框中指定的功能。

[0116] 这些计算机程序指令也可装载到计算机或其他可编程数据处理设备上,使得在计算机或其他可编程设备上执行一系列操作步骤以产生计算机实现的处理,从而在计算机或 其他可编程设备上执行的指令提供用于实现在流程图一个流程或多个流程和/或方框图一 个方框或多个方框中指定的功能的步骤。

[0117] 本领域普通技术人员可以理解实现上述实施例方法中的全部或部分流程,是可以通过计算机程序来指令相关的硬件来完成,所述的程序可存储于一计算机可读取存储介质中,该程序在执行时,可包括如上述各方法的实施例的流程。其中,所述的存储介质可为磁碟、光盘、只读存储记忆体(Read-Only Memory,ROM)或随机存储记忆体(Random AccessMemory,RAM)等。

[0118] 以上所述仅为本发明的优选实施例而已,并不用于限制本发明,对于本领域的技术人员来说,本发明可以有各种更改和变化。凡在本发明的精神和原则之内,所作的任何修改、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(a)



图2(b)



图3(a)



图3(b)



图4 (a)



图4(b)



图5(a)



图5(b)



图5(c)



图5(d)



图6 (a)



图6(b)





图6(c)



图6 (d)



图6 (e)



图7 (a)







图7 (c)



图7 (d)



图8 (a)



图8(b)