



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 115655133 A

(43) 申请公布日 2023. 01. 31

(21) 申请号 202211356466.6

(22) 申请日 2022.11.01

(71) 申请人 中国石油大学(北京)

地址 102249 北京市昌平区府学路18号

(72) 发明人 陈勉 张鲲鹏 金衍 王溯

赵长俊

(74) 专利代理机构 北京润平知识产权代理有限公司

公司 11283

专利代理师 刘喜云

(51) Int. Cl.

G01B 11/16 (2006.01)

G01L 1/24 (2006.01)

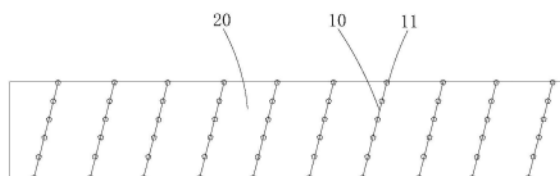
权利要求书2页 说明书8页 附图2页

(54) 发明名称

光纤应变感测管柱及地应力测量方法

(57) 摘要

本发明属于地应力测量技术领域,具体涉及一种光纤应变感测管柱及地应力测量方法,光纤应变感测管柱包括管柱本体和光纤传感器,管柱本体设有用于连接注液加压系统的入口端,管柱本体能够根据内外压力变化产生应变;光纤传感器粘接在管柱本体的外周壁上,并能够测量管柱本体的应变,光纤传感器上设有多个间隔布置的感测点和用于标记多个所述感测点的空间位置的定位标记。本发明采用缠绕式的光纤应变感测管柱,将高空间分辨率的光纤传感器安装至地层内,能够根据光纤应变感测管柱上不同的感测点所测量的应变,计算出不同感测段所在位置的不同地应力状态,实现了地应力的多层位的实时测量。本发明较传统地应力测量方法操作更加简易,并且可测量连续时空域的地应力状态,大大提高了地应力的测量能力。



1. 一种光纤应变感测管柱,其特征在于,包括:

管柱本体(20),设有用于连接注液加压系统的入口端,所述管柱本体(20)能够根据内外压力变化产生应变;和

光纤传感器(10),粘结在所述管柱本体(20)的外周壁上并能够测量所述管柱本体(20)的应变,所述光纤传感器(10)上设有多个间隔布置的感测点(11)和用于标记多个所述感测点(11)的空间位置的定位标记。

2. 根据权利要求1所述的光纤应变感测管柱,其特征在于,所述管柱本体(20)的外周壁设有螺纹状的浅刻槽,所述光纤传感器(10)位于所述浅刻槽内并沿所述浅刻槽螺旋缠绕在所述管柱本体(20)的外周侧。

3. 根据权利要求1所述的光纤应变感测管柱,其特征在于,所述光纤应变感测管柱还包括包裹在所述管柱本体(20)外壁上的薄膜。

4. 一种地应力测量方法,其特征在于,应用于根据权利要求1~3中任意一项所述的光纤应变感测管柱中,所述地应力测量方法包括:

步骤S10:制备光纤应变感测管柱,并获取所述光纤应变感测管柱的应变校正系数;

步骤S20:将所述光纤应变感测管柱埋入岩体中;

步骤S30:对所述光纤应变感测管柱施加不同的预设压力,并根据所述应变校正系数测量所述光纤应变感测管柱的外周壁在不同预设压力下的应变实际值;

步骤S40:根据所述应变实际值获取地层弹性参数;

步骤S50:获取上覆地层压力,根据所述上覆地层压力和所述地层弹性参数,计算岩体的静态地应力。

5. 根据权利要求4所述的地应力测量方法,其特征在于,所述步骤S10包括:

密封所述光纤应变感测管柱;

通过注液加压系统向所述光纤应变感测管柱内施加预设压力,并根据预设压力计算得出所述光纤应变感测管柱的校正应变实际值;

记录各所述感测点(11)所测量出的校正应变测量值;

利用解析法或数值模拟方法,将所述校正应变测量值与所述校正应变实际值进行线性校正,即可得到应变校正系数。

6. 根据权利要求4所述的地应力测量方法,其特征在于,所述步骤S20包括:

对岩体进行钻安装孔;

将所述光纤应变感测管柱放置于所述安装孔中,并在所述安装孔的内壁面与所述光纤应变感测管柱的外壁面之间灌注水泥。

7. 根据权利要求4所述的地应力测量方法,其特征在于,所述步骤S30包括:

通过注液加压系统向所述光纤应变感测管柱内注入不同预设压力的高压液体,以使光纤应变感测管柱的内部产生不同的内压;

采用光纤传感器(10)对光纤应变感测管柱的应变进行感测,并获取所述光纤应变感测管柱在不同内压作用下的应变测量值;

根据所述应变测量值和所述应变校正系数得到所述应变实际值。

8. 根据权利要求4所述的地应力测量方法,其特征在于,所述步骤S40包括:

步骤S41:根据所述光纤应变感测管柱的预设压力和应变实际值与地层弹性参数之间

的函数关系,获取应变假设值和地层弹性参数假设值;

步骤S42:重复步骤S41,直至所述应变假设值与所述应变实际值之间的误差达到预设误差范围,所述地层弹性参数假设值即为岩体实际的地层弹性参数。

9.根据权利要求4所述的地应力测量方法,其特征在于,所述步骤S50包括:

利用所述地层弹性参数与静态地应力的线性关系式获取静态地应力与上覆地层压力之间的比值,并根据所述上覆地层压力和所述比值获取所述静态地应力。

10.根据权利要求9所述的地应力测量方法,其特征在于,所述地层弹性参数与静态地应力的线性关系式为:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_x = \sigma_z \frac{v \left(\frac{2(2v-1)}{E} - \frac{v_{xy} + v_{xz}}{E_x} + \frac{1-2v_{yz}}{E_y} + \frac{1}{E_z} \right) - (v-1) \left(\frac{2v-1}{E} + \frac{1-(v_{xy} + v_{xz})}{E_x} \right)}{v \left(\frac{2(2v-1)}{E} + \frac{1-(2v_{xy} + v_{xz})}{E_x} + \frac{1-v_{yz}}{E_y} \right) - (v-1) \left(\frac{2v-1}{E} - \frac{v_{xz}}{E_x} - \frac{v_{yz}}{E_y} + \frac{1}{E_z} \right)} \\ \sigma_y = \sigma_z \frac{v \left(\frac{2(2v-1)}{E} + \frac{1-(2v_{xz} + v_{xy})}{E_x} - \frac{v_{yz}}{E_y} + \frac{1}{E_z} \right) - (v-1) \left(\frac{2v-1}{E} - \frac{v_{xy}}{E_x} + \frac{1-v_{yz}}{E_y} \right)}{v \left(\frac{2(2v-1)}{E} + \frac{1-(2v_{xy} + v_{xz})}{E_x} + \frac{1-v_{yz}}{E_y} \right) - (v-1) \left(\frac{2v-1}{E} - \frac{v_{xz}}{E_x} - \frac{v_{yz}}{E_y} + \frac{1}{E_z} \right)} \end{array} \right.$$

其中, E_x 、 E_y 、 E_z 、 v_{xy} 、 v_{xz} 、 v_{yz} 均为地层弹性参数; σ_x 、 σ_y 为水平地应力; σ_z 为上覆地层压力。

光纤应变感测管柱及地应力测量方法

技术领域

[0001] 本发明属于地应力测量技术领域,尤其涉及一种光纤应变感测管柱及地应力测量方法。

背景技术

[0002] 地应力,指地层原位地应力状态。在钻井工程、矿业工程、道路工程等岩土工程领域中,地应力作为关键工程参数之一,受到了广泛的关注。因此,如何对地应力进行准确地测量和预测,一直是岩土工程领域的研究热点。

[0003] 但是,传统地应力测量只能进行单点位的静态测量,测量结果仅可代表某一时刻、某一位置处的地应力状态,在油气井固井或投产完成后,无法再次进行地应力测量;而且测量地应力的空间分辨率越高,需要测量的点位越多,传统方式仅可测量某一点位或某一深度处的地应力状态;此外,传统地应力测量方法需要进行取心、钻孔、下传感器、水力压裂、嵌扁千斤顶等一系列复杂操作,测量难度偏高。

发明内容

[0004] 本发明的主要目的是提出一种光纤应变感测管柱及地应力测量方法,旨在解决现有技术中的地应力测量方法只能进行单点位静态测量且操作难度高的技术问题。

[0005] 为了实现上述目的,本发明提供一种光纤应变感测管柱,其中,光纤应变感测管柱包括:

[0006] 管柱本体,设有用于连接注液加压系统的入口端,管柱本体能够根据内外压力变化产生应变;

[0007] 光纤传感器,粘接在管柱本体的外周壁上,并能够测量管柱本体的应变,光纤传感器上设有多个间隔布置的感测点和用于标记多个感测点的空间位置的定位标记。

[0008] 在本发明实施例中,管柱本体的外周壁设有螺纹状的浅刻槽,光纤传感器位于浅刻槽内并沿浅刻槽螺旋缠绕在管柱本体的外周侧。

[0009] 在本发明实施例中,光纤应变感测管柱还包括包裹在管柱本体外壁上的薄膜。

[0010] 在本发明实施例中,还提出一种地应力测量方法,应用于光纤应变感测管柱中,地应力测量方法包括:

[0011] 步骤S10:制备光纤应变感测管柱,并获取光纤应变感测管柱的应变校正系数;

[0012] 步骤S20:将光纤应变感测管柱埋入岩体中;

[0013] 步骤S30:对光纤应变感测管柱施加不同的预设压力,并根据应变校正系数测量光纤应变感测管柱的外周壁在不同预设压力下的应变实际值;

[0014] 步骤S40:根据应变实际值获取地层弹性参数;

[0015] 步骤S50:获取上覆地层压力,根据上覆地层压力和地层弹性参数,计算岩体的静态地应力。

[0016] 在本发明实施例中,步骤S10包括:

[0017] 密封光纤应变感测管柱；

[0018] 通过注液加压系统向光纤应变感测管柱内施加预设压力,并根据预设压力计算出光纤应变感测管柱的校正应变实际值；

[0019] 记录各感测点所测量出的校正应变测量值；

[0020] 利用解析法或数值模拟方法,将校正应变测量值与校正应变实际值进行线性校正,即可得到应变校正系数。

[0021] 在本发明实施例中,步骤S20包括：

[0022] 对岩体进行钻安装孔；

[0023] 将光纤应变感测管柱放置于安装孔中,并在安装孔的内壁面与光纤应变感测管柱的外壁面之间灌注水泥。

[0024] 在本发明实施例中,步骤S30包括：

[0025] 通过注液加压系统向光纤应变感测管柱内注入不同预设压力的高压液体,以使光纤应变感测管柱的内部产生不同的内压；

[0026] 采用光纤传感器对光纤应变感测管柱的应变进行感测,并获取光纤应变感测管柱在不同内压作用下的应变测量值；

[0027] 根据应变测量值和应变校正系数得到应变实际值。

[0028] 在本发明实施例中,步骤S40包括：

[0029] 步骤S41:根据光纤应变感测管柱的预设压力和应变实际值与地层弹性参数之间的函数关系,获取应变假设值和地层弹性参数假设值；

[0030] 步骤S42:重复步骤S41,直至应变假设值与应变实际值之间的误差达到预设误差范围,地层弹性参数假设值即为岩体实际的地层弹性参数。

[0031] 在本发明实施例中,步骤S50包括：

[0032] 利用地层弹性参数与静态地应力的线性关系式获取静态地应力与上覆地层压力之间的比值,并根据上覆地层压力和比值获取静态地应力。

[0033] 在本发明实施例中,地层弹性参数与静态地应力的线性关系式为：

$$[0034] \quad \begin{cases} \sigma_x = \sigma_z \frac{v \left(\frac{2(2v-1)}{E} - \frac{v_{xy} + v_{xz}}{E_x} + \frac{1-2v_{yz}}{E_y} + \frac{1}{E_z} \right) - (v-1) \left(\frac{2v-1}{E} + \frac{1-(v_{xy} + v_{xz})}{E_x} \right)}{v \left(\frac{2(2v-1)}{E} + \frac{1-(2v_{xy} + v_{xz})}{E_x} + \frac{1-v_{yz}}{E_y} \right) - (v-1) \left(\frac{2v-1}{E} - \frac{v_{xz}}{E_x} - \frac{v_{yz}}{E_y} + \frac{1}{E_z} \right)} \\ \sigma_y = \sigma_z \frac{v \left(\frac{2(2v-1)}{E} + \frac{1-(2v_{xz} + v_{xy})}{E_x} - \frac{v_{yz}}{E_y} + \frac{1}{E_z} \right) - (v-1) \left(\frac{2v-1}{E} - \frac{v_{xy}}{E_x} + \frac{1-v_{yz}}{E_y} \right)}{v \left(\frac{2(2v-1)}{E} + \frac{1-(2v_{xy} + v_{xz})}{E_x} + \frac{1-v_{yz}}{E_y} \right) - (v-1) \left(\frac{2v-1}{E} - \frac{v_{xz}}{E_x} - \frac{v_{yz}}{E_y} + \frac{1}{E_z} \right)} \end{cases}$$

[0035] 其中, E_x 、 E_y 、 E_z 、 v_{xy} 、 v_{xz} 、 v_{yz} 均为地层弹性参数; σ_x 、 σ_y 为水平地应力; σ_z 为上覆地层压力。

[0036] 通过上述技术方案,本发明实施例所提供的光纤应变感测管柱具有如下的有益效果：

[0037] 相较于传统的地应力测量,采用本发明的光纤应变感测管柱对地应力进行测量时,能够对地应力在不同时间段的动态变化进行持续感测;而且采用缠绕式的光纤应变感测管柱,将高空间分辨率的光纤传感器安装至地层内,由于光纤传感器具有多个感测点且空间感测分辨率高达1mm,可以实现对地应力的高空间分辨率的多点位测量。此外,光纤应变感测管柱埋入地层岩体之后,可作为生产管柱、结构管柱、流体流动通道或岩体内结构件等一直留在地层中,以实现地应力状态在不同时间段的持续感测,无需额外操作。

[0038] 本发明的其它特征和优点将在随后的具体实施方式部分予以详细说明。

附图说明

[0039] 附图是用来提供对本发明的理解,并且构成说明书的一部分,与下面的具体实施方式一起用于解释本发明,但并不构成对本发明的限制。在附图中:

[0040] 图1是根据本发明一实施例中地应力测量方法的流程示意图;

[0041] 图2是根据本发明一实施例中光纤应变感测管柱的结构示意图;

[0042] 图3是根据本发明一实施例中应变实际值对预设压力的响应曲线图。

[0043] 附图标记说明

[0044]	标号	名称	标号	名称
	10	光纤传感器	20	管柱本体
	11	感测点		

具体实施方式

[0045] 以下结合附图对本发明的具体实施例进行详细说明。应当理解的是,此处所描述的具体实施例仅用于说明和解释本发明,并不用于限制本发明。

[0046] 下面参考附图描述根据本发明的光纤应变感测管柱及地应力测量方法。

[0047] 如图2所示,在本发明的实施例中,提供一种光纤应变感测管柱,其中,光纤应变感测管柱包括管柱本体20和光纤传感器10,管柱本体20设有用于连接注液加压系统的入口端,管柱本体20能够根据内外压力变化产生应变;光纤传感器10粘接在管柱本体20的外周壁上,并能够测量管柱本体20的应变,光纤传感器10上设有多个间隔布置的感测点11和用于标记多个所述感测点11的空间位置的定位标记。

[0048] 采用本发明的光纤应变感测管柱对地应力进行测量时,能够对地应力在不同时间段的动态变化进行持续感测;而且采用缠绕式的光纤应变感测管柱,将高空间分辨率的光纤传感器10安装至地层内,由于光纤传感器10具有多个感测点11且空间感测分辨率高达1mm,可以实现对地应力的高空间分辨率的多点位测量。

[0049] 在制备光纤应变感测管柱时,首先将光纤传感器10螺旋式的缠绕在管柱本体20的外周壁上,通过502胶水或酚醛树脂等粘接剂,将光纤传感器10固定在管柱本体20上。此时,光纤传感器10包裹在管柱本体20的外壁面上,并与管柱本体20之间建立起应变对应关系,使光纤传感器10可对管柱本体20的外表面应变进行同步感测。

[0050] 在对光纤传感器10进行缠绕时,可采用刻槽定位或定螺旋升角缠绕两种方法对光纤传感器10进行缠绕安装。刻槽定位法为:通过机械加工,在管柱本体20的外周壁上进行车制螺纹状的浅刻槽,并将光纤传感器10安装于浅刻槽内并沿浅刻槽螺旋缠绕在管柱本体20

的外周侧,此方式能够在对管柱本体20强度影响细微的情况下,实现光纤传感器10的安装定位,并且可以利用浅刻槽对光纤传感器10进行保护,使其不受外界面粘接物质的影响,提高光纤传感器10的感测稳定性。定螺旋升角缠绕法为:利用光纤缠绕设备,以一定螺旋升角,稳定地将光纤传感器10以预设的位置固定在管柱本体20上。定螺旋升角法的优势在于对管柱本体20结构件强度和应力分布不产生额外影响,刻槽定位法的优势在于可以更好地保护光纤应变感测的稳定性。

[0051] 由于光纤传感器10的物理特性限制,光纤传感器10上具有多个等间隔布置的感测点11,光纤传感器10通过测量感测点11的空间位置反应管柱本体20的应变,因此,要对感测点11在管柱本体20的外周壁上的初始分布位置进行标记,以明确感测点11的初始位置,从而在感测点11的外置变化中得到管柱本体20的应变。具体操作为:在光纤传感器10与管柱本体20粘结完毕后,利用点压法或液氮点喷法对感测点11进行标记。其中,点压法利用探针等尖锐刚性物体对光纤传感器10上的某点进行点按标记,使被点按处产生局部应变,并利用感测点11之间的间隔距离得到下一感测点11的具体空间位置,进而推演后续各感测点11的空间位置;液氮点喷法与点压法类似,采用液氮点喷的方式,使光纤传感器10局部产生明显频移,进而实现标记。

[0052] 在管柱本体20上安装好光纤传感器10之后,需要对管柱本体20进行薄膜包裹,以屏蔽界面粘结物质的影响,保证光纤传感器10的测量精度。

[0053] 需要说明的是,在现有技术中,差应变法作为常用的室内试验法,被广泛地应用于地应力测量中,其理论基础是地层中的微裂缝的记忆性:当岩体上的井眼形成后,井壁及被钻取的岩体所处的由远场地应力控制的平衡状态被破坏,发生应力释放,形成了新的应力平衡状态。而岩体中含有的大量微裂缝,受应力释放影响,发生膨胀、压缩、剪切等位移作用,从而影响井壁及岩体的岩石弹性参数,因此地应力状态被蕴藏在岩石弹性参数中。传统差应变法实验对象是取至地面的井下岩心,先对岩心表面贴敷应变片,再对岩体施加静水压力,记录加压过程中的应变,通过计算主应力比来代表远场地应力比值,进而计算得到远场地应力。

[0054] 随着传感技术的发展,光纤感测技术的测量准确度和空间分辨率等关键技术指标得到了大幅度的提升。与传统应变测量方法相比,光纤传感技术具有高空间分辨率、高频率、高精度等优点。其在岩土工程领域中的应用成为新的研究热点之一。本发明结合了光纤应变传感技术和差应变法,发明了一种全新的地应力测量方法,该方法能够适用于室内试验、井下测量等多种测量场景。

[0055] 本发明的理论基础与传统差应变法理论相同,即岩石的微裂缝具有记忆性,可以将地应力状态信息储存在岩石的弹性参数中,进而能够利用岩石的弹性力学参数对地应力进行反演。本发明中的地应力测量方法的核心部件为上述的光纤应变感测管柱。在地应力测量时,首先需要在地层岩体上开设井口,再将光纤应变感测管柱从井口埋入地层中,并利用固井水泥将光纤应变感测管柱与地层相粘结,进而形成应力传递关系。此时,光纤传感器10感测的应变为管柱本体20与水泥界面处的应变,由于地层的地应力状态在管柱下入前就已释放,形成了新的平衡状态,所以光纤应变感测管柱下入地层后,无应变信号产生。此时采用内压法,人为地向管柱本体20的内部注入高压液体,进而使光纤传感器10产生可反映地层弹性参数的应变信号。

[0056] 利用内压法可以得到不同内压作用时的管柱本体20外表面处的应变值。值得注意的是,由于光纤传感器10具有高空间分辨率特性,感测管柱可得到数量庞大的不同时间、不同空间的应变感测结果。此时,可以对应变感测结果进行反演,以得到地层弹性参数随管柱本体20内压的变化曲线,进而反演得到某一时段的地应力。此外,该发明可以得到如岩石各向异性弹性参数的衍生参数。

[0057] 在得到了某一时段的地应力后,由于光纤应变感测管柱埋藏于地层岩体中,可作为生产管柱、结构管柱、流体流动通道或岩体内结构件等一直留在地层中。当地层中的地应力随着时间发生变化时,光纤应变感测管柱的外表面会产生应变并发出相应的应变信号。对该应变信号的连续监测,可以对地应力变化进行反演,进而得到不同时间轴上的动态地应力变化结果,以实现地对地应力状态在不同时间段的持续感测。

[0058] 需要注意的是,为了形成管柱本体20的内部高压,需要保证管柱本体20为密封结构,从而需要在管柱本体20的两端形成物理封隔,根据不同的地应力测量环境可以选择封隔器封隔或端部焊接等方式密封管柱本体20。

[0059] 如图1所示,为了进一步地理解本申请的技术方案,如下对地应力测量方法的整体工作步骤进行详细描述,本发明的地应力测量方法包括:

[0060] 步骤S10:制备光纤应变感测管柱,并获取光纤应变感测管柱的应变校正系数;

[0061] 步骤S20:将光纤应变感测管柱埋入岩体中;

[0062] 步骤S30:对光纤应变感测管柱施加不同的预设压力,并根据应变校正系数测量光纤应变感测管柱的外周壁在不同预设压力下的应变实际值,预设压力的范围约为0-25MPa;

[0063] 步骤S40:根据应变实际值获取地层弹性参数;

[0064] 步骤S50:获取上覆地层压力,根据上覆地层压力和地层弹性参数,计算岩体的静态地应力。

[0065] 相较于传统地应力测量方法,本发明采用光纤应变感测管柱作为传感媒介,对地层岩体的应变进行感测,进而反演出地层弹性参数和地应力。本发明的地应力测量方法能够对地应力在不同时间段的动态变化进行持续感测;而且采用缠绕式的光纤应变感测管柱,将高空间分辨率的光纤传感器10安装至地层内,由于光纤传感器10具有多个感测点11且空间感测分辨率高达1mm,可以实现地对地应力的高空间分辨率的多点位测量;此外,本发明的地应力测量方法的操作难度低,光纤应变感测管柱埋入地层岩体之后,可作为生产管柱、结构管柱、流体流动通道或岩体内结构件等一直留在地层中,当需要测量地应力在不同时段下的动态数值时,仅需通过重新测量的应变实际值,对地层弹性参数进行新一轮反演,进而可以得到不同时间轴上的动态地应力变化结果,以实现地对地应力状态在不同时间段的持续感测。有效解决了现有技术中的地应力测量方法只能进行对单一时间段的地应力进行静态测量的技术问题,无需额外操作。

[0066] 在本发明实施例中,在步骤S10包括制备光纤应变感测管柱并获取光纤应变感测管柱的应变校正系数。由于光纤本体应变为瑞利后散射光频移值,光纤传感器10得到的测量值与实际产生的应变值不同且二者之间存在线性关系,因此需要运用应变校正系数将测量值校正为管柱本体20外表面的实际应变值。

[0067] 此时,需要采用内压法取得应变校正系数。具体的,先通过注液加压系统向光纤应变感测管柱内施加预设压力,并利用解析解或数值模拟方法,根据预设压力对内压管柱空

间应变进行计算,得出光纤应变感测管柱的校正应变实际值,然后记录各感测点11所测量出的校正应变测量值,最后利用解析法或数值模拟方法,将校正应变测量值与校正应变实际值进行线性校正,即可得到应变校正系数。

[0068] 得到应变校正系数之后,即可将光纤传感器10检测出的应变测量值变成应变实际值,大大增加了光纤传感器10对管柱本体20应变的检测精度,进而使本申请中的地应力测量方法的测量效果更佳的精准。

[0069] 在本发明实施例中,在步骤S20包括:

[0070] 对岩体进行钻安装孔,再将光纤应变感测管柱放置于安装孔中,并在安装孔的内壁面与光纤应变感测管柱的外壁面之间灌注水泥。通过水泥粘结光纤应变感测管柱与地层,使光纤应变感测管柱与地层之间实现了无缝连接,进而在光纤应变感测管柱和地层之间形成应力应变传递关系,使光纤应变感测管柱能够与地层的应变同步,从而光纤传感器10测量的应变能够更好地反应出地层中的地应力状态。

[0071] 在本发明实施例中,步骤S30包括:

[0072] 通过注液加压系统向光纤应变感测管柱内注入不同预设压力的高压液体,以使光纤应变感测管柱的内部产生不同的内压;采用光纤传感器10对光纤应变感测管柱的应变进行感测,并获取光纤应变感测管柱在不同内压作用下的应变测量值;最后根据应变测量值和前面得出的应变校正系数得到光纤应变感测管柱的应变实际值。

[0073] 此时,在光纤应变感测管柱内施加预设压力后,管柱本体20-混凝土粘结层-地层的组合体同时形变,地层在光纤应变感测管柱的预设压力作用下产生应变,得到如图3所示的应变实际值对预设压力的响应曲线。

[0074] 光纤应变感测管柱上多个感测点11能测量多个应变实际值,集中反应在图3中,对多个不同空间位置的感测点11进行检测,能够更加准确的反应出应变实际值与预设压力之间的关系,提高了测量实验的准确性。

[0075] 在本发明实施例中,步骤S40即为地层弹性参数的反演过程,包括:

[0076] 步骤S41:根据光纤应变感测管柱的预设压力和应变实际值与地层弹性参数之间的关系,利用有限元法,能够获取应变假设值和地层弹性参数假设值;

[0077] 步骤S42为:不断重复步骤S41,获取新的应变假设值和地层弹性参数假设值,直至应变假设值与应变实际值之间的误差达到允差范围,即可认为岩体实际的地层弹性参数与地层弹性参数假设值相同。

[0078] 其中,针对不同预设压力下的地层弹性参数的反演过程,地层弹性参数的反演过程可以利用数值法和解析法两种方式进行。其中,数值法即利用数值模拟软件或算法,对地层弹性参数进行反演;解析法即利用解析解模型对弹性力学参数进行反演的方法。由于数值法和解析法实行的理论基础均建立在上述步骤S40上,在此不对数值法和解析法进行过多赘述。

[0079] 此外,可以利用优化法、机器学习法、深度学习法对地层弹性参数的反演过程进行算术优化。其中优化法包括粒子群法、模拟退火法、蛇优化、鲸鱼优化等进化算法。机器学习常用方法包括随机森林、支持向量机等。深度学习法包括BP神经网络及结合优化算法的神经网络等。在本发明的技术构思范围内,可以对弹性力学的反演过程进行各种方式的优化,包括上述各个具体优化方法以任何合适的方式进行组合,或其它常规的优化算法,本发明

对各种可能的算法不再另行说明。但这些算法同样应当视为本发明所公开的内容,均属于本发明的保护范围。

[0080] 需要注意的是,在地层中开设井口埋入光纤应变感测管柱前,地层受到井眼周边的应力挤压,使地层裂缝处于过度闭合状态。光纤应变感测管柱从井眼埋入地层后,在内部加压膨胀的过程中,井眼周边的地层裂缝受力重新开启,导致了加压过程中地层的密度不断变小,在图3中反映为曲线斜率的不断变大。

[0081] 具体的,图3的曲线随着预设压力的增大可以依次分为第一线性区、非线性区和第二线性区,当预设压力位于第一线性区时地层裂缝处于过度闭合状态,地层弹性参数为恒定值,曲线斜率不变,地层处于各向同性状态;当预设压力位于非线性区时地层裂缝处于逐渐张开的状态,地层弹性参数非线性变化,曲线斜率逐渐变大;当预设压力位于第二线性区时地层裂缝处于完全张开状态,地层弹性参数为恒定值,曲线斜率不变,地层处于正交各向异性状态。

[0082] 利用步骤S40对第一线性区的数据进行地层弹性参数的反演,可得到地层弹性参数: E 、 ν ,其中, E 为各向同性地层弹性模量; ν 为各向同性地层泊松比。

[0083] 利用步骤S40对第二线性区的数据进行地层弹性参数的反演,可得到地层弹性参数: E_x 、 E_y 、 E_z 、 ν_{xy} 、 ν_{xz} 、 ν_{yz} ,其中, E_x 、 E_y 、 E_z 为正交各向异性地层弹性模量; ν_{xy} 、 ν_{xz} 、 ν_{yz} 为正交各向异性地层泊松比。

[0084] 在本发明实施例中,步骤S50包括:

[0085] 结合上覆地层压力,利用地层弹性参数与地应力的线性关系式获取静态地应力与上覆地层压力之间的比值,并根据上覆地层压力和所得的比值获取地层的静态地应力。

[0086] 其中,上覆地层压力可以通过如下公式计算得到:

$$[0087] \quad \sigma_z = H\rho_r g$$

[0088] 其中, σ_z 为上覆地层压力, H 为感测点11位于地层中的深度; ρ_r 为地层的总密度, ρ_r 可由密度测井测得; g 为重力加速度。

[0089] 地层弹性参数与地应力的线性关系式为:

$$[0090] \quad \begin{cases} \sigma_x = \sigma_z \frac{\nu \left(\frac{2(2\nu-1)}{E} - \frac{\nu_{xy} + \nu_{xz}}{E_x} + \frac{1-2\nu_{yz}}{E_y} + \frac{1}{E_z} \right) - (\nu-1) \left(\frac{2\nu-1}{E} + \frac{1-(\nu_{xy} + \nu_{xz})}{E_x} \right)}{\nu \left(\frac{2(2\nu-1)}{E} + \frac{1-(2\nu_{xy} + \nu_{xz})}{E_x} + \frac{1-\nu_{yz}}{E_y} \right) - (\nu-1) \left(\frac{2\nu-1}{E} - \frac{\nu_{xz}}{E_x} - \frac{\nu_{yz}}{E_y} + \frac{1}{E_z} \right)} \\ \sigma_y = \sigma_z \frac{\nu \left(\frac{2(2\nu-1)}{E} + \frac{1-(2\nu_{xz} + \nu_{xy})}{E_x} - \frac{\nu_{yz}}{E_y} + \frac{1}{E_z} \right) - (\nu-1) \left(\frac{2\nu-1}{E} - \frac{\nu_{xy}}{E_x} + \frac{1-\nu_{yz}}{E_y} \right)}{\nu \left(\frac{2(2\nu-1)}{E} + \frac{1-(2\nu_{xy} + \nu_{xz})}{E_x} + \frac{1-\nu_{yz}}{E_y} \right) - (\nu-1) \left(\frac{2\nu-1}{E} - \frac{\nu_{xz}}{E_x} - \frac{\nu_{yz}}{E_y} + \frac{1}{E_z} \right)} \end{cases}$$

[0091] 其中, σ_x 、 σ_y 为水平地应力。根据上式与步骤S40中求出的地层弹性参数: E_x 、 E_y 、 E_z 、 ν_{xy} 、 ν_{xz} 、 ν_{yz} ,最终分别得到 σ_x 与 σ_z 、 σ_y 与 σ_z 的比值,进而能够求出水平地应力 σ_x 和 σ_y 的具体数值,完成对地应力(包括水平地应力和上覆地层压力)的测量。

[0092] 总的来说,本发明能够根据光纤应变感测管柱上不同的感测点11所测量的应变,

计算出不同感测点11所在位置的不同地应力,从而实现了地应力的多点位测量,而且不需要进行传统测量方法的复杂操作,大大降低了地应力的测量难度。

[0093] 需要注意的是,地层中的地应力和地层弹性参数不是一个恒定值,而是随着时间不断变化的,本发明的地应力测量方法不仅能够测量某一时段的静态地应力,而且光纤应变感测管可作为生产管柱、结构管柱、流体流动通道或岩体内结构件等一直留在地层中。当地层中的地应力和地层弹性参数随着时间发生变化时,光纤应变感测管柱的外表面会产生应变并不断的测得新的应变实际值,可以重新对地层弹性参数及地应力进行新一轮反演,以得到不同时间轴上的地层弹性参数,并实现对地应力状态在不同时间段的持续感测。有效解决了现有技术中的地应力测量方法只能进行对单一时间段的地应力进行静态测量的技术问题。

[0094] 在本发明的描述中,需要理解的是,术语“第一”、“第二”仅用于描述目的,而不能理解为指示或暗示相对重要性或者隐含指明所指示的技术特征的数量。由此,限定有“第一”、“第二”的特征可以明示或者隐含地包括至少一个该特征。在本发明的描述中,“多个”的含义是至少两个,例如两个,三个等,除非另有明确具体的限定。

[0095] 在本发明中,除非另有明确的规定和限定,术语“安装”、“相连”、“连接”、“固定”等术语应做广义理解,例如,可以是固定连接,也可以是可拆卸连接,或成一体;可以是机械连接,也可以是电连接或彼此可通讯;可以是直接相连,也可以通过中间媒介间接相连,可以是两个元件内部的连通或两个元件的相互作用关系,除非另有明确的限定。对于本领域的普通技术人员而言,可以根据具体情况理解上述术语在本发明中的具体含义。

[0096] 在本说明书的描述中,参考术语“一个实施例”、“一些实施例”、“示例”、“具体示例”、或“一些示例”等的描述意指结合该实施例或示例描述的具体特征、结构、材料或者特点包含于本发明的至少一个实施例或示例中。在本说明书中,对上述术语的示意性表述不必针对的是相同的实施例或示例。而且,描述的具体特征、结构、材料或者特点可以在任一个或多个实施例或示例中以合适的方式结合。此外,在不相互矛盾的情况下,本领域的技术人员可以将本说明书中描述的不同实施例或示例以及不同实施例或示例的特征进行结合和组合。

[0097] 尽管上面已经示出和描述了本发明的实施例,可以理解的是,上述实施例是示例性的,不能理解为对本发明的限制,本领域的普通技术人员在本发明的范围内可以对上述实施例进行变化、修改、替换和变型。

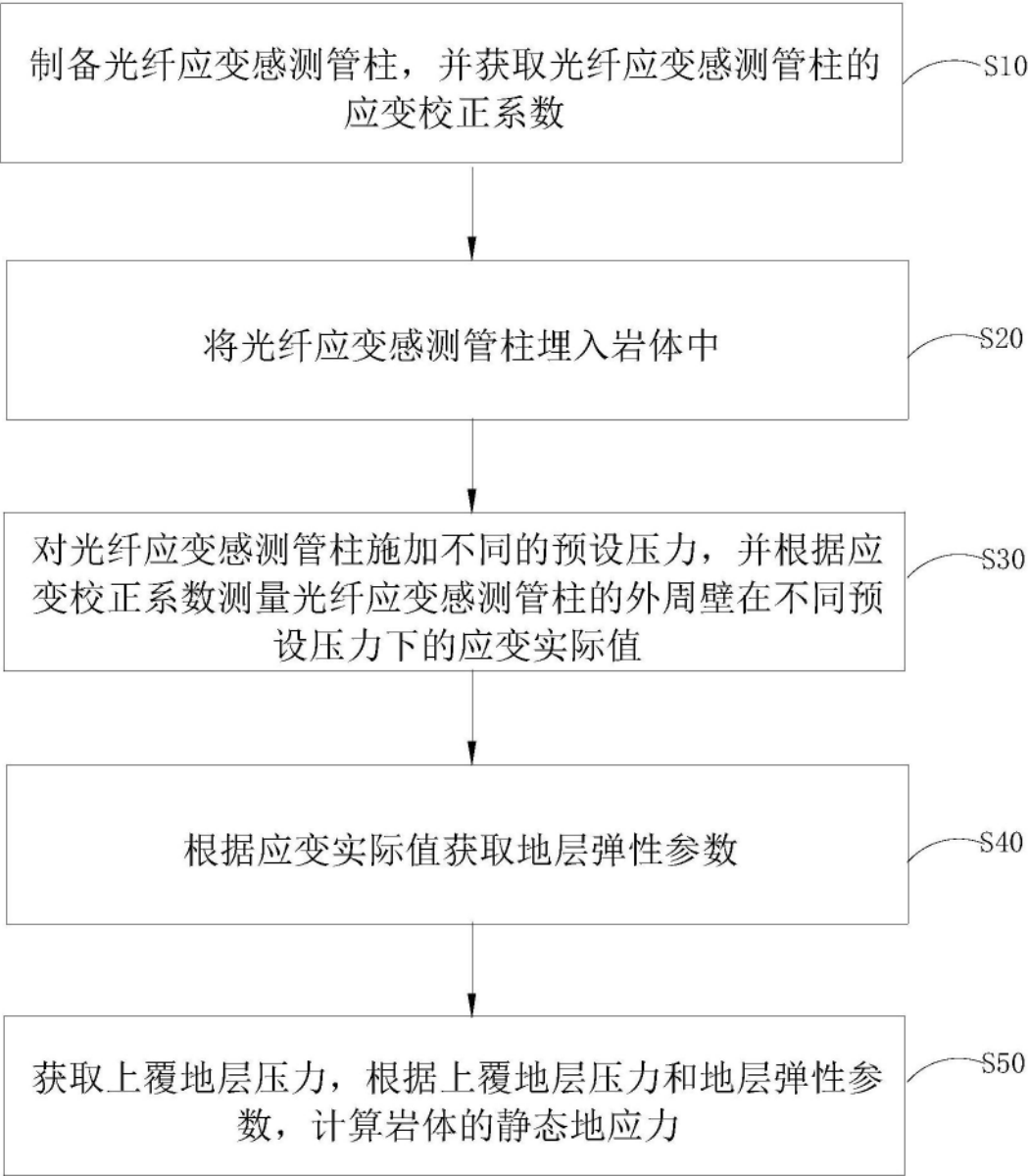


图1

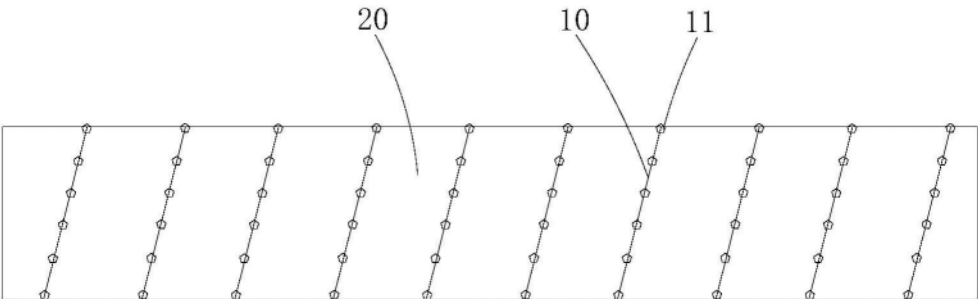


图2

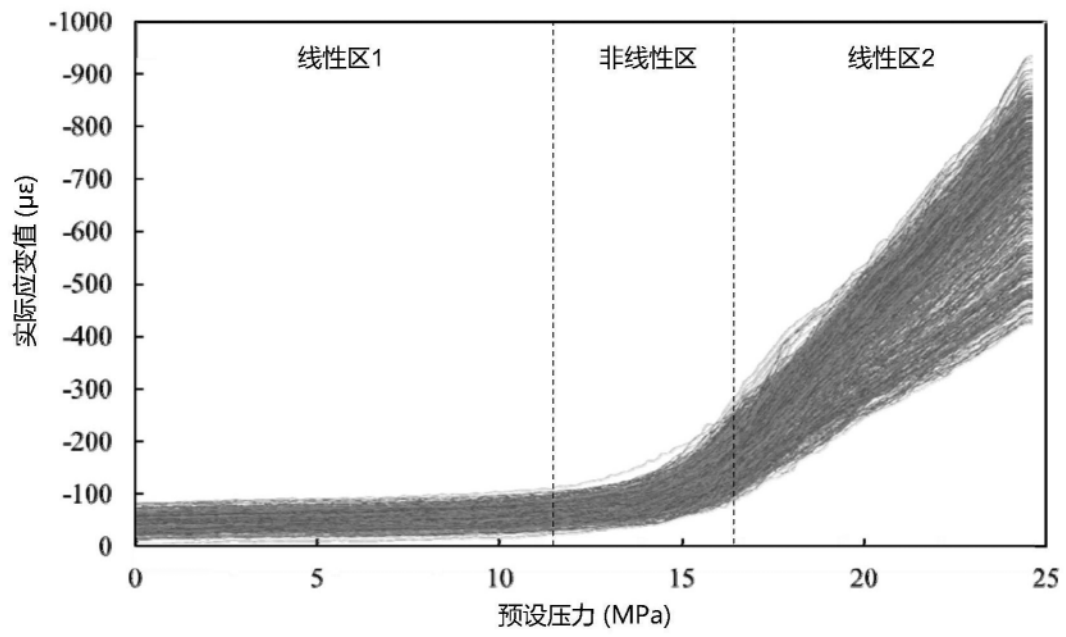


图3