



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 104040110 B

(45)授权公告日 2019.01.15

(21)申请号 201280066343.7

(22)申请日 2012.11.02

(65)同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 104040110 A

(43)申请公布日 2014.09.10

(30)优先权数据
61/628,690 2011.11.04 US

(85)PCT国际申请进入国家阶段日
2014.07.04

(86)PCT国际申请的申请数据
PCT/US2012/063340 2012.11.02

(87)PCT国际申请的公布数据
W02013/067363 EN 2013.05.10

(73)专利权人 普拉德研究及开发股份有限公司
地址 英国维尔京群岛

(72)发明人 R·吴 O·克雷斯 X·翁
C-E·科昂 H·古

(74)专利代理机构 北京派特恩知识产权代理有限公司 11270
代理人 康艳青 姚开丽

(51)Int.Cl.
E21B 43/267(2006.01)

(56)对比文件
US 2008183451 A1,2008.07.31,
US 2008183451 A1,2008.07.31,
US 2010004906 A1,2010.01.07,

审查员 李慧杰

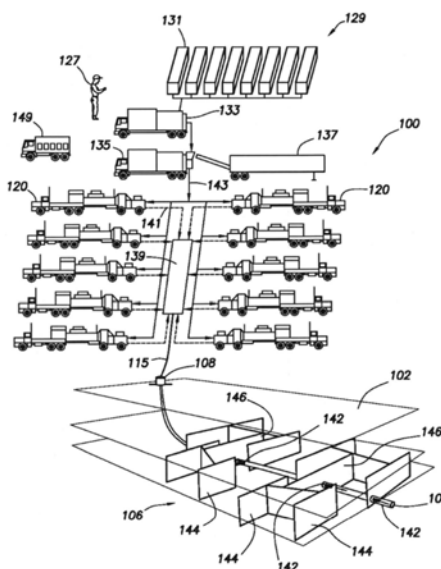
权利要求书3页 说明书17页 附图19页

(54)发明名称

复杂压裂网络中水力压裂相互作用建模

(57)摘要

提出在具有裂缝网络的井场执行压裂操作的方法。该方法包括获得井场数据和地质力学模型,并且生成裂缝网络的随着时间变化的水力压裂裂缝发展模式。该生成包括:从井眼开始延伸出水力压裂裂缝并且进入地下地层的裂缝网络中,以形成水力压裂网络;在延伸出之后确定水力压裂参数;确定支撑剂通过水力压裂网络的传输参数;以及通过水力压裂参数、传输参数和地质力学模型确定裂缝尺寸。该方法还包括在水力压裂裂缝上执行应力投影以确定裂缝之间的应力干涉并且基于所确定的应力干涉重复该生成。该方法还包括确定交叉特性。



1. 一种在井场执行压裂操作的方法,所述井场位于地下地层附近,地下地层具有穿过其的井眼和位于其中的裂缝网络,该裂缝网络包括天然裂缝,所述井场通过将具有支撑剂的注射流体注入到裂缝网络中而增产,该方法包括:

获得包括天然裂缝的天然裂缝参数的井场数据并且获得地下地层的地质力学模型;

生成裂缝网络的随时间变化的水力压裂裂缝发展模式,该生成包括:

将具有支撑剂的注射流体注入到井眼中的裂缝网络中,从井眼开始延伸出水力压裂裂缝并且进入地下地层的裂缝网络中,以形成包括天然裂缝和水力压裂裂缝的水力压裂网络;

在延伸出之后确定水力压裂裂缝的水力压裂参数;

确定支撑剂通过水力压裂网络的传输参数;以及

通过所确定的水力压裂参数、所确定的传输参数和地质力学模型来确定水力压裂裂缝的裂缝尺寸;以及

在水力压裂裂缝上执行应力投影,以确定水力压裂裂缝之间的应力干涉,其中,执行应力投影包括执行3D位移不连续法;以及

在裂缝网络变化时随时间重复所述生成,且基于所执行的应力投影随时间更新裂缝发展模式。

2. 如权利要求1所述的方法,其特征在于,进一步包括:如果水力压裂裂缝遇到另一条裂缝,则确定在遇到的另一条裂缝处的交叉特性,所述重复包括基于所确定的应力干涉和交叉特性来重复所述生成。

3. 如权利要求2所述的方法,其特征在于,水力压裂裂缝发展模式未被交叉特性改变。

4. 如权利要求2所述的方法,其特征在于,水力压裂裂缝发展模式被交叉特性改变。

5. 如权利要求2所述的方法,其特征在于,水力压裂网络的压裂压力大于作用在遇到的裂缝上的应力,水力压裂裂缝发展模式沿着遇到的裂缝扩展。

6. 如权利要求2所述的方法,其特征在于,水力压裂裂缝发展模式沿着遇到的裂缝继续扩展直到到达天然裂缝的端部。

7. 如权利要求6所述的方法,其特征在于,水力压裂裂缝发展模式在天然裂缝的端部处改变方向,所述水力压裂裂缝发展模式在天然裂缝的端部处沿垂直于最小应力的方向延伸。

8. 如权利要求1所述的方法,其特征在于,水力压裂裂缝发展模式根据应力投影垂直于局部主应力扩展。

9. 如权利要求1所述的方法,其特征在于,应力投影包括对每个水力压裂裂缝执行位移不连续法。

10. 如权利要求1所述的方法,其特征在于,应力投影包括围绕井场的多个井眼执行应力投影,并且使用在所述多个井眼上执行的应力投影来重复所述生成。

11. 如权利要求1所述的方法,其特征在于,应力投影包括在井眼的多个增产阶段执行应力投影。

12. 如权利要求1所述的方法,其特征在于,进一步包括确证水力压裂裂缝发展模式。

13. 如权利要求12所述的方法,其特征在于,所述确证包括将水力压裂裂缝发展模式与裂缝网络增产中的至少一种二维模拟结果进行对比。

14. 如权利要求1所述的方法,其特征在于,所述延伸出包括基于天然裂缝参数和地下地层上的最小应力和最大应力沿着水力压裂裂缝发展模式来延伸出所述水力压裂裂缝。

15. 如权利要求1所述的方法,其特征在于,确定裂缝尺寸包括评估地震测量、蚂蚁追踪、声波测量、地质勘测及它们的组合中的一种。

16. 如权利要求1所述的方法,其特征在于,井场数据进一步包括地质学数据、岩石物理学数据、地质力学数据、测井测量数据、完井数据、历史数据及它们的组合中的至少一种。

17. 如权利要求1所述的方法,其特征在于,天然裂缝参数通过观察井孔成像记录、从井眼测量结果中估算裂缝尺寸、获得微地震图像及它们的组合中的一种生成。

18. 一种在井场执行压裂操作的方法,所述井场位于地下地层附近,地下地层具有穿过其的井眼和位于其中的裂缝网络,该裂缝网络包括天然裂缝,所述井场通过将具有支撑剂的注射流体注入到裂缝网络中而增产,该方法包括:

获得包括天然裂缝的天然裂缝参数的井场数据并且获得地下地层的地质力学模型;

生成裂缝网络的随时间变化的水力压裂裂缝发展模式,该生成包括:

通过将具有支撑剂的注射流体注入到井眼中的裂缝网络中、从井眼开始延伸出水力压裂裂缝并且进入地下地层的裂缝网络中以形成包括天然裂缝和水力压裂裂缝的水力压裂网络来使井场增产;

在延伸出之后确定水力压裂裂缝的水力压裂参数;

确定支撑剂通过水力压裂网络的传输参数;以及

通过所确定的水力压裂参数、所确定的传输参数和地质力学模型来确定水力压裂裂缝的裂缝尺寸;以及

在水力压裂裂缝上执行应力投影,以确定水力压裂裂缝之间的应力干涉,其中,执行应力投影包括执行3D位移不连续法;

如果水力压裂裂缝遇到另一条裂缝,则基于所确定的应力干涉确定水力压裂裂缝和遇到的裂缝之间的交叉特性;以及

在裂缝网络随时间变化时重复所述生成,以考虑所执行的应力投影和交叉特性。

19. 如权利要求18所述的方法,其特征在于,进一步包括确证水力压裂裂缝发展模式。

20. 一种在井场执行压裂操作的方法,所述井场位于地下地层附近,地下地层具有穿过其的井眼和位于其中的裂缝网络,该裂缝网络包括天然裂缝,该方法包括:

通过将具有支撑剂的注射流体从井眼地面注入井眼中、然后注入裂缝网络中而对井场进行增产;

获得包括天然裂缝的天然裂缝参数的井场数据并且获得地下地层的地质力学模型;

生成裂缝网络的随时间变化的水力压裂裂缝发展模式,该生成包括:

将具有支撑剂的注射流体注入到井眼中的裂缝网络中,从井眼开始延伸出水力压裂裂缝并且进入地下地层的裂缝网络中,以形成包括

天然裂缝和水力压裂裂缝的水力压裂网络;

在延伸出之后确定水力压裂裂缝的水力压裂参数;

确定支撑剂通过水力压裂网络的传输参数;以及

通过所确定的水力压裂参数、所确定的传输参数和地质力学模型来确定水力压裂裂缝的裂缝尺寸;以及

在水力压裂裂缝上执行应力投影,以确定水力压裂裂缝之间的应力干涉,其中,执行应力投影包括执行3D位移不连续法;以及

在裂缝网络变化时,迭代地重复所述生成,其中,所述重复基于所执行的应力投影考虑在裂缝网络随时间被增产时多个裂缝的相互作用和影响。

21. 如权利要求20所述的方法,其特征在于,进一步包括确证水力压裂裂缝发展模式。

22. 如权利要求20所述的方法,其特征在于,进一步包括:如果水力压裂裂缝遇到另一条裂缝,则确定水力压裂裂缝和遇到的另一条裂缝之间的交叉特性,所述重复包括基于所确定的应力干涉和交叉特性来重复所述生成。

复杂压裂网络中水力压裂相互作用建模

技术领域

[0001] 本公开总体涉及执行井场操作的方法和系统。更具体地,本公开针对的是执行压裂操作的方法和系统,例如勘测地下地层以及在地下地层中表征水力压裂网络。

背景技术

[0002] 为了帮助从油井和气井中回收碳氢化合物,包围这些井的地下地层可被水力压裂。水力压裂可以用于在地下地层中产生裂缝以允许油或气朝向井移动。通过将特别设计的高压和高速流体(在这里被称作“压裂流体”或“压裂浆体”)通过一个或多个井眼引入地层而使地层被压裂。由于地层内部的固有应力,水力压裂可以从井眼开始沿两个相反的方向延伸出几百英尺。在特定环境下,可以形成复杂的压裂网络。复杂的压裂网络可以包括诱发的水力压裂裂缝和天然的裂缝,它们可以沿着多个方位角在多个平面和方向、以及多个区域中交叉或者不交叉。

[0003] 当前的水力压裂监控方法和系统可以绘制出压裂发生的位置和压裂的范围。一些微地震监控的方法和系统可以通过使用模型化的到达时间和/或射线路径将地震到达时间和分裂信息绘制到三维空间中而处理地震活动位置。这些方法和系统可以用于推测水力压裂随着时间的扩展。

[0004] 通过压裂增产所产生的水力压裂模式是复杂的并且可以形成采用相关的微地震活动分布进行标记的压裂网络。复杂的水力压裂网络已经发展成可以表现产生的水力压裂裂缝。在美国专利/申请No.6101447、No.7363162、No.7788074、No.20080133186、No.20100138196和No.20100250215中公开了压裂模型的例子。

发明内容

[0005] 在至少一个方面,本公开涉及在井场执行压裂操作的方法。井场位于地下地层附近,地下地层具有贯穿其自身的井眼和位于其中的压裂网络。压裂网络具有其内在的天然裂缝。井场可以通过将具有压裂支撑剂的注射流体注入到压裂网络中而增产。该方法包括获得包括天然裂缝的天然裂缝参数的井场数据以及获得地下地层的地质力学模型并且生成压裂网络的随着时间变化的水力压裂裂缝发展模式。该生成包括从井眼开始延伸出水力压裂裂缝并且使其进入地下地层的压裂网络中以形成包括天然裂缝和和水力压裂裂缝的水力压裂网络,在延伸出之后确定水力压裂裂缝的水力压裂参数,确定压裂支撑剂通过水力压裂网络的传输参数,并且从所确定的水力压裂参数、所确定的传输参数和地质力学模型中确定水力压裂裂缝的裂缝尺寸。该方法还包括在水力压裂裂缝上执行应力投影以确定水力压裂裂缝之间的应力干涉并且基于所确定的应力干涉重复上述生成。

[0006] 如果水力压裂裂缝遇到天然裂缝,该方法还可包括基于所确定的应力干涉而确定水力压裂裂缝和与其相遇的裂缝之间的交叉特性,并且该重复可以基于所确定的应力干涉和交叉特性重复该生成。该方法还可包括通过将具有压裂支撑剂的注射流体注入到压裂网络中而使井场增产。

[0007] 本方法还可以包括,如果水力压裂遇到天然裂缝,则确定在遇到的天然裂缝处的交叉特性,并且其中所述重复包括基于所确定的应力干涉和所述交叉特性来重复所述生成。裂缝发展模式可以被交叉特性改变或不改变。水力压裂网络的压裂压力可以比作用在遇到的裂缝上的应力更大,并且裂缝发展模式可以沿着遇到的裂缝扩展。裂缝发展模式可以沿着遇到的裂缝持续扩展直到到达天然裂缝的端部。裂缝发展模式可以在天然裂缝的端部改变方向,并且裂缝发展模式可以在天然裂缝的端部处沿垂直于最小应力的方向延伸。裂缝发展模式可根据应力投影垂直于局部主应力扩展。

[0008] 应力投影可包括对每个水力压裂裂缝执行位移不连续法。应力投影包括围绕井场的多个井眼执行应力投影并且使用在多个井眼上执行的应力投影而重复该生成。应力投影包括在井眼中的多个增产阶段执行应力投影。

[0009] 该方法还可包括确证裂缝发展模式。该确证可包括将裂缝发展模式与至少一种压裂网络增产的模拟结果进行对比。

[0010] 该延伸出可包括基于天然裂缝参数和地下地层上的最小应力和最大应力沿着裂缝发展模式延伸出水力压裂裂缝。确定裂缝尺寸可包括评估地震测量、蚂蚁追踪、声波测量、地质测量及它们的组合中的一种。井场数据可包括地质学数据、岩石物理数据、地质力学数据、测井测量数据、完井数据、历史数据及它们的组合中的至少一种。天然裂缝参数可以通过观测井孔成像记录、从井眼测量估算裂缝尺寸、获得微地震图像及它们的组合中之一而生成。

附图说明

[0011] 用于表征井眼应力的系统和方法的实施例参照后面的图进行描述。在全部附图中相同的数字用于标记相同的特征和部件。

[0012] 图1.1为描绘压裂操作的水力压裂现场的示意图;

[0013] 图1.2为在水力压裂现场上描绘有微地震活动的示意图;

[0014] 图2为2D压裂的示意图;

[0015] 图3为应力投影效应的示意图。

[0016] 图4为将两个平行的直线裂缝的2D DDM和Flac3D进行比较的示意图。

[0017] 图5.1-5.3为描绘延伸的裂缝在各个位置的应力的2D DDM和Flac3D曲线图;

[0018] 图6.1-6.2为描绘两个初始平行的裂缝分别在各向同性和各向异性的应力场中的扩展路径的曲线图;

[0019] 图7.1-7.2为描绘两个初始偏移的裂缝分别在各向同性和各向异性的应力场中的扩展路径的曲线图;

[0020] 图8为沿着水平井的横向平行裂缝的示意图;

[0021] 图9为描绘五个平行裂缝的长度的曲线图;

[0022] 图10为描绘图9的平行裂缝的UFM压裂形状和宽度的示意图;

[0023] 图11.1-11.2为分别描绘高射孔摩擦情况和大型压裂空间情况下裂缝形状的示意图;

[0024] 图12为描绘微地震绘制的图;

[0025] 图13.1-13.4分别为与阶段1-4的微地震测量相比较的模拟压裂网络的示意图;

- [0026] 图14.1-14.4为描绘各个阶段分布的压裂网络的示意图；
- [0027] 图15为描绘执行压裂操作的方法的流程图表；并且
- [0028] 图16.1-16.4为描绘在压裂操作过程中围绕井眼的压裂发展的示意图。

具体实施方式

[0029] 后面的描述包括体现了本发明主题的技术的典型的设备、方法、技术以及控制序列。然而，可以理解的是描述的实施例在没有这些具体的细节时也可以实施。

[0030] 已经形成用于获悉地下裂缝网络的模型。该模型考虑到各种因素和/或数据，但是可以不必考虑裂缝和注射的流体之间以及裂缝之间泵送的流体量或机械作用的限制。限定的模型可以提供对涉及的机理的基本理解，但是在数学描述上是复杂的和/或需要计算机处理数据源和时间以提供对水力压裂扩展的准确模拟。限定的模型可以配置成执行模拟以考虑随着时间变化并且在期望条件下的因素，例如裂缝之间的相互作用。

[0031] 一种非传统的压裂模型(UFM) (或者复合模型) 可以用于模拟具有预先存在的天然裂缝的地层中的复杂裂缝网络扩展。多个裂缝分支可以同时扩展并且彼此交叉/交错。每个开放的裂缝可以对周围的岩石和相邻的裂缝施加额外的应力，这可以被称作“应力投影”效应。应力投影可能引起对裂缝参数(例如，宽度)的限制，这例如可能导致很大的支撑剂渗透的风险。该应力投影还可能改变裂缝扩展路径并且影响裂缝网络模式。该应力投影可能影响复杂裂缝模型中裂缝之间相互作用的建模。

[0032] 提出了一种计算复杂水力压裂网络中应力投影计算的方法。该方法可以基于具有对有限的裂缝高度进行修正的增强的2D位移不连续法(2DDDM)或3D位移不连续法(3D DDM)执行。通过2D DDM计算出的应力场可以与3D数值模拟(3D DDM或者flac3D)进行比较以确定3D裂缝问题的近似值。这种应力投影计算可以集成在UFM中。两个裂缝的简单情况的结果显示，每个裂缝例如根据它们的初始相关位置彼此吸引或排斥，并且可以与独立的2D非平面水力压裂模型进行比较。

[0033] 提供了来自多射孔群的平面和复合裂缝扩展的附加例子，显示出裂缝相互作用可以控制裂缝的尺寸和扩展模式。在具有小应力各向异性的地层中，由于裂缝趋于彼此排斥因而裂缝相互作用可能导致裂缝发生巨大的背离。然而，即使当应力各向异性很大并且由于裂缝相互作用受限而发生裂缝转向时，应力投影对裂缝宽度仍然可能具有很强的作用，这可能影响到分配进入多射孔群的注射速率，以及由此引起的整个裂缝网络形状和支撑剂放置。

[0034] 图1.1和1.2描绘了关于井场100的裂缝扩展。井场具有从井口装置108开始在地面位置延伸并且穿过位于其下的地下地层102延伸的井孔104。裂缝网络106围绕井孔104延伸。泵系统129围绕井口装置108设置用于使流体通过管道142。

[0035] 泵系统129被描绘为受记录维护和运行数据和/或根据规定的泵送安排表执行操作的现场操作者127控制。泵系统129在压裂操作中将流体从地面泵送到井眼104。

[0036] 泵系统129可包括水源，例如多个水罐131，向凝胶水合单元133提供水。凝胶水合单元133将来自水罐131的水与凝胶剂混合形成凝胶。凝胶接着被送入搅拌机135，在其中与来自支撑剂运送装置137的支撑剂混合，形成压裂流体。凝胶剂可以用于提高压裂流体的粘性，并且使支撑剂悬浮在压裂流体中。其还可以作用为摩擦减小剂使得在具有较小摩擦压

力的同时具有较高的泵送速率。

[0037] 压裂流体接着从搅拌机135被泵送到具有柱塞泵的处理车120中,如实线143所示。每个处理车120接收低压压裂流体并且将其排放到处于高压的共用集管139(有时被称作发射拖车或发射器)中,如虚线141所示。发射器139接着将压裂流体从处理车120引导到井眼104中,如实线115所示。可以使用一个或多个处理车120来提供具有期望流速的压裂流体。

[0038] 每个处理车120通常可以以任意的速率运行,例如在其最大运行容量下很好地运行。在运行容量下工作的处理车120可以允许其中一个失效并且其余的在较高的速度下运行以弥补失效泵的缺席。可以采用计算机操作的控制系统149在压力运行过程中管理整个泵系统129。

[0039] 各种流体,例如传统的具有支撑剂的激发流体,都可以用于产生压裂。其它流体,例如粘性凝胶、“滑溜水(slick water,其具有摩擦减少物(聚合物)和水)”也可以用于水力压裂页岩气井。这种“滑溜水”可以是薄流体形式(例如,接近于水的粘性)并且可以用于产生更复杂的裂缝,例如可以监测到的多微震裂缝。

[0040] 如图1.1和1.2所示,裂缝网络包括设置在围绕井眼104的各个位置上的裂缝。这些裂缝可以是在流体注射之前具有的天然裂缝144,或者在注射过程中围绕地层102产生的水力压裂裂缝146。图1.2示出基于使用传统方法聚集的微震活动148的裂缝网络106。

[0041] 多级增产是非传统气藏开发的规范。然而,对页岩气藏完井进行最优化的障碍可能包括缺少能够正确地模拟在这些地层中经常能看到的复杂裂缝扩展的水力压裂模型。已经开发出了复杂的压裂网络模型(或者UFM)(例如参见Weng,X.,Kresse,O.,Wu,R.,and Gu,H.,Modeling of Hydraulic Fracture Propagation in a Naturally Fractured Formation.Paper SPE140253presented at the SPE Hydraulic Fracturing Conference and Exhibition,Woodlands,Texas,USA,January24-26(2011)(此后称作“Weng2011”);Kresse,O.,Cohen,C,Weng,X,Wu,R.,and Gu,H2011(此后称作“Kresse2011”).Numerical Modeling of Hydraulic Fracturing in Naturally Fractured Formations.45th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium,San Francisco,CA,June26-29,它们的全部内容由此被包含于此)。

[0042] 现有的模型可以用于模拟裂缝扩展、岩石变形以及流体在处理过程中产生的复杂裂缝网络中的流动。该模型还可以被用于解决在裂缝网络中流动的流体以及裂缝的弹性变形的完全耦合问题,其与传统的虚拟3D压裂模型具有相似的假设和控制方程。泵送的流体和支撑剂的每种组分的迁移方程都可以被解决。

[0043] 传统的平面压裂模型可以对裂缝网络的各个方面进行建模。提供的UFM还可以包括模拟具有预先存在的天然裂缝的水力压裂的相互作用的能力,即确定当它们相互作用并且沿着天然裂缝继续扩展时水力压裂扩展穿过天然裂缝还是被天然裂缝阻止。水力压裂在与天然裂缝的交叉点上的分支促进了复杂裂缝网络的发展。

[0044] 交叉模型可以从Renshaw and Pollard(例如参见,Renshaw,C E.and Pollard,D.D.1995,An Experimentally Verified Criterion for Propagation across Unbounded Frictional Interfaces in Brittle,Linear Elastic Materials.Int.J.Rock Mech.Min.Sci.&Geomech.Abstr.,32:237-249(1995)由此其全部内容作为参考被包含于此)界面交叉标准延伸,应用于任意的交叉角度,并且可以被开发

(例如参见,Gu,H.and Weng,X.Criterion for Fractures Crossing Frictional Interfaces at Non-orthogonal Angles.44th US Rock symposium,Salt Lake City,Utah,June27-30,2010(此后被称作“Gu和Weng 2010”),由此其全部内容作为参考被包含于此)并且经过实验数据的查验(例如参见,Gu,H.,Weng,X.,Lund,J.,Mack,M.,Ganguly,U.and Suarez-Rivera R.2011.Hydraulic Fracture Crossing Natural Fracture at Non-Orthogonal Angles,A Criterion,Its Validation and Applications.Paper SPE139984presented at the SPE Hydraulic Fracturing Conference and Exhibition,Woodlands,Texas,January24-26(2011)(此后被称作“Gu et al.2011”),由此其全部内容作为参考被包含于此)并且整合在UFM中。

[0045] 为了正确地模拟多条或复杂的裂缝的扩展,压裂模型可以考虑相邻的水力压裂分支之间的相互作用,其通常被称作“应力投影”效应。当单个平面水力压裂在有限流体净压力下被打开时,其可以在周围岩石上施加与净压力成比例的应力场。

[0046] 在具有恒定有限高度的无限长垂直裂缝的极限情况中,可以提供由开放的裂缝所施加的应力场的解析表达式。例如参见Warpinski,N.F.and Teufel,L.W.,Influence of Geologic Discontinuities on Hydraulic Fracture Propagation,JPT,Feb.,209-220(1987)(此后称为“Warpinski和Teufel”)以及Warpinski,N.R.,and Branagan,P.T.,Altered-Stress Fracturing.SPE JPT,September,1989,990-997(1989),其全部内容由此通过引用被结合到这里。净压力(或者更精确地为产生指定裂缝开口的压力)可以在垂直于裂缝的方向上在最小化的原处应力上施加压应力,其在压裂面上等于净压力,但是随着与裂缝的距离的增大而快速减少。

[0047] 在超过裂缝高度的距离上,诱导应力可能只是净压力的一小部分。因此,术语“应力投影”可以用于描述围绕裂缝的区域中应力的增加。如果产生的第二水力压裂裂缝平行于已有的开放裂缝,并且如果第二水力压裂裂缝落在“应力投影”中(即与已有裂缝的距离小于裂缝高度),第二裂缝实际上可能经受大于初始原处应力的闭合应力。因此,可能需要更高的压力来扩展裂缝,和/或裂缝与相应的单个裂缝相比需要更窄的宽度。

[0048] 应力投影研究的一个应用可以包括从水平井眼开始同时扩展的多个裂缝之间的裂缝间隔。在极低渗透的页岩中,裂缝密集分布用于气藏的有效排出。然而,应力投影效应可以防止裂缝在其它裂缝的近邻中扩展(例如参见Fisher,M.K.,J.R.Heinze,C.D.Harris,B.M.Davidson,C.A.Wright,and K.P.Dunn,Optimizing horizontal completion techniques in the Barnett Shale using microseismic fracture mapping.SPE90051presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition,Houston,26-29September2004,其全部内容由此通过引用被整体地结合到这里)。

[0049] 过去已经对平行的裂缝之间的干扰进行了研究(例如参见Warpinskiand Teufel;Britt,L.K.and Smith,M.B.,Horizontal Well Completion,Stimulation Optimization,and Risk Mitigation.Paper SPE125526presented at the2009SPE Eastern Regional Meeting,Charleston,September23-25,2009;Cheng,Y.2009.Boundary Element Analysis of the Stress Distribution around Multiple Fractures:Implications for the Spacing of Perforation Clusters of Hydraulically Fractured Horizontal

Wells. Paper SPE125769 presented at the 2009 SPE Eastern Regional Meeting, Charleston, September 23–25, 2009; Meyer, B.R. and Bazan, L.W., A Discrete Fracture Network Model for Hydraulically Induced Fractures: Theory, Parametric and Case Studies. Paper SPE140514 presented at the SPE Hydraulic Fracturing Conference and Exhibition, Woodlands, Texas, USA, January 24–26, 2011; Roussel, N.P. and Sharma, M.M., Optimizing Fracture Spacing and Sequencing in Horizontal-Well Fracturing, SPEPE, May, 2011, pp. 173–184, 其全部内容由此通过引用被结合到这里)。这些研究包括静态条件下的平行裂缝。

[0050] 应力投影的一种效应是在多个平行裂缝的中间区域中的裂缝可以具有更小的宽度,这是由于来自邻近裂缝的增强的压应力(例如参见 Germanovich, L.N., and Astakhov D., Fracture Closure in Extension and Mechanical Interaction of Parallel Joints. *J. Geophys. Res.*, 109, B02208, doi:10.1029/2002JB002131 (2004); Olson, J.E., Multi-Fracture Propagation Modeling: Applications to Hydraulic Fracturing in Shales and Tight Sands. 42nd US Rock Mechanics Symposium and 2nd US-Canada Rock Mechanics Symposium, San Francisco, CA, June 29–July 2, 2008, 其全部内容通过引用被结合到这里)。当多个裂缝同时扩展时,进入裂缝的流量分配可能是动态过程并且可能受到裂缝的净压力的影响。净压力高度依赖于裂缝的宽度,并且由此,应力投影对流量分配和裂缝尺寸的影响需要进一步的研究。

[0051] 同时扩展的多个裂缝的动力学也依赖于初始裂缝的相对位置。如果裂缝是平行的,例如在多个裂缝与水平井眼垂直的情况中,裂缝可彼此排斥,导致裂缝向外弯曲。然而,如果多个裂缝以阶梯样式分布时,例如对于从不垂直于裂缝平面的水平井眼起始的裂缝,相邻裂缝之间的相互作用使得它们的端部彼此吸引并且甚至连接到一起(例如参见 Olson, J.E. Fracture Mechanics Analysis of Joints and Veins. PhD dissertation, Stanford University, San Francisco, California (1990); Yew, C.H., Mear, M.E., Chang, C.C., and Zhang, X.C. On Perforating and Fracturing of Deviated Cased Wellbores. Paper SPE26514 presented at SPE68th Annual Technical Conference and Exhibition, Houston, TX, Oct. 3–6 (1993); Weng, X., Fracture Initiation and Propagation from Deviated Wellbores. Paper SPE26597 presented at SPE68th Annual Technical Conference and Exhibition, Houston, TX, Oct. 3–6 (1993), 其全部内容由此通过引用被结合到这里)。

[0052] 当水力压裂裂缝与朝向不同方向的次生裂缝交叉时,其在次生裂缝上施加与净压力成比例的附加闭合应力。该应力可以被提取出并且被考虑到在对裂缝性地层的压力依赖泄露进行分析的裂缝开启压力的计算中(例如参见 Nolte, K., Fracturing Pressure Analysis for nonideal behavior. *JPT*, Feb. 1991, 210–218 (SPE20704) (1991) (此后被称作“Nolte1991”), 其全部内容由此通过引用被结合到这里)。

[0053] 对于更加复杂的裂缝,可以具有上面讨论的各种裂缝的相互作用的组合。为了正确地说明这些相互作用并且保持计算效率使其能够结合到复杂裂缝网络模型中,可以构建正确的建模框架。基于增强的2D位移不连续法(2D DDM)的方法可以用于计算在指定裂缝上以及在其余的复杂裂缝网络的岩石中的诱导应力(例如参见 Olson, J.E., Predicting

Fracture Swarms-The Influence of Sub critical Crack Growth and the Crack-Tip Process Zone on Joints Spacing in Rock. In The Initiation, Propagation and Arrest of Joints and Other Fractures, ed. J.W. Cosgrove and T. Engelder, Geological Soc. Special Publications, London, 231, 73-87 (2004) (此后被称作“Olson2004”), 其全部内容由此通过引用被结合到这里)。裂缝转向还可以基于由于应力投影效应而在扩展的裂缝端部之前的改变的局部应力方向而建立模型。给出结合有裂缝相互作用建模的来自UFM模型的模拟结果。

[0054] UFM模型描述

[0055] 为了模拟由多个相互交叉的裂缝组成的复杂裂缝网络的扩展, 可以使用控制压裂过程的基础物理过程的方程。基本的控制方程例如包括控制裂缝网络中的流体流动的方程、控制裂缝变形、以及裂缝扩展/相互作用标准的方程。

[0056] 连续方程假定流体流动沿着裂缝网络扩展, 具有以下质量守恒:

$$[0057] \quad \frac{\partial q}{\partial s} + \frac{\partial(H_{fl}\bar{w})}{\partial t} + q_L = 0 \quad (1)$$

[0058] 其中, q 为水力压裂裂缝内沿着长度的局部流量, \bar{w} 为裂缝在位置 $s = s(x, y)$ 处的横截面的平均宽度或开口, H_{fl} 为裂缝中流体的高度, 并且 q_L 为穿过水力压裂裂缝壁进入基质的每单位高度的泄漏容积率 (压裂流体渗透进入周围的可渗透介质的速度), 其通过 Carter 泄漏模型 (Carter's leak-off model) 进行表达。裂缝端部作为尖端扩展, 并且水力压裂裂缝的长度在任意给定时间 t 被限定为 $l(t)$ 。

[0059] 驱动流体的特性可以由幂律指数 n' (流体流性指数) 和稠度指数 K' 限定。流体流动可以是层流、湍流或者透过支撑剂包的达西流 (Darcy flow), 并且相应地可以采用不同的规律描述。对于任意给定裂缝分支中的幂律流体的 1D 层流这种普遍的情况而言, 可以使用泊肃叶定律 (Poiseuille law, 例如参见 Nolte, 1991):

$$[0060] \quad \frac{\partial p}{\partial s} = -\alpha_0 \frac{1}{\bar{w}^{2n'+1}} \frac{q}{H_{fl}} \left| \frac{q}{H_{fl}} \right|^{n'-1} \quad (2)$$

[0061] 其中:

$$[0062] \quad \alpha_0 = \frac{2K'}{\phi(n')^{n'}} \cdot \left(\frac{4n'+2}{n'} \right)^{n'}; \quad \phi(n') = \frac{1}{H_{fl}} \int_{H_{fl}} \left(\frac{w(z)}{\bar{w}} \right)^{\frac{2n'+1}{n'}} dz \quad (3)$$

[0063] 这里, $w(z)$ 表示裂缝宽度, 其为当前位置 s 的深度的函数, α 为系数, n' 为幂律指数 (流体稠度指数), ϕ 为形函数, 并且 dz 为沿着公式中的裂缝长度的积分增量。

[0064] 裂缝宽度通过弹性方程与流体压力关联。岩石的弹性 (其可以被认为是大致均质、各向同性、线性的弹性材料) 可以通过杨氏模量 E 和泊松比 ν 限定。对于位于具有可变的水平应力 $\sigma_h(x, y, z)$ 和流体压力 p 的层状介质中的垂直裂缝来说, 宽度截面 (width profile) (w) 可以通过给出的解析解法确定:

$$[0065] \quad w(x, y, z) = w(p(x, y), H, z) \quad (4)$$

[0066] 其中 w 是在具有空间坐标 x, y, z (裂缝单元的中心的坐标) 的点上的裂缝宽度; $p(x,$

y) 为流体压力, H为裂缝单元高度, 并且z为沿着裂缝单元在点(x, y)上的垂直坐标。

[0067] 由于裂缝的高度可以变化, 控制方程组还可以包括例如在Kresse2011中描述的高度增长计算。

[0068] 除了上面描述的方程, 整体体积平衡条件也可以得到满足:

$$[0069] \quad \int_0^t Q(t)dt = \int_0^{L(t)} H(s,t)\bar{w}(s,t)ds + \int_{H_L} \int_0^t \int_0^{L(t)} 2g_L ds dt dh_1 \quad (5)$$

[0070] 其中 g_L 为流体渗漏速度, $Q(t)$ 为时间相关的注射速率, $H(s, t)$ 为裂缝在空间点s(x, y)并且在时间t处的高度, ds 为沿着裂缝长度用于积分的长度增量, dt 为时间增量, dh_1 为渗漏高度的增量, H_L 为渗漏高度, 并且 s_0 为喷射损失系数。方程(5)表示在时间t之内泵送的流体的总体积等于裂缝网络中的流体体积和直到时间t从裂缝渗漏的流体体积。这里的 $L(t)$ 表示HFN在时间t的总长度并且 S_0 为喷射损失系数。边界条件需要流率、净压力以及裂缝宽度在所有裂缝端部处为零。

[0071] 方程1-5的系统与初始和边界条件一起可以用于表述一组控制方程。将这些方程组合并且将裂缝网络离散成小单元就可以形成每个单元的流体压力p的非线性系统方程, 简化为 $f(p) = 0$, 其可以使用阻尼牛顿-拉夫逊方法进行解析。

[0072] 在对水力压裂在天然开裂的气藏中的扩展进行建模时可以考虑裂缝的相互作用。这例如包括, 水力压裂裂缝和天然裂缝之间的相互作用, 还有水力压裂裂缝之间的相互作用。对于水力压裂裂缝和天然裂缝之间的相互作用, 可以在UFM中执行半解析交叉准则, 例如使用在Gu和Weng2010以及Gueta12011中描述的方法。

[0073] 应力投影的建模

[0074] 对于平行裂缝, 应力投影可以通过相邻裂缝的应力叠加来表示。图2为2D裂缝200关于具有x-轴和y-轴的坐标系统的示意图。沿着2D裂缝的各个点, 例如位于 $h/2$ 处的第一端、位于 $-h/2$ 处的第二端以及中间点被延伸到观察点(x, y)。每条线L从沿着2D裂缝的各个点成角度 θ_1 、 θ_2 延伸到观察点。

[0075] 围绕具有内部压力p的2D裂缝的应力场例如可以使用在Warpinski和Teufel中描述的技术来计算。影响裂缝宽度的应力为 σ_x , 并且可以通过下面的公式计算得出:

$$[0076] \quad \sigma_x = p \left[1 - \frac{\bar{L}}{\sqrt{\bar{L}_1 \bar{L}_2}} \cos\left(\theta - \frac{\theta_1 + \theta_2}{2}\right) - \frac{\bar{L}}{(\bar{L}_1 \bar{L}_2)^{\frac{3}{2}}} \sin\theta \sin\left(\frac{3}{2}(\theta_1 + \theta_2)\right) \right] \quad (6)$$

[0077] 其中,

$$[0078] \quad \theta = \arctan\left(-\frac{\bar{x}}{\bar{y}}\right)$$

$$[0079] \quad \theta_1 = \arctan\left(-\frac{\bar{x}}{\bar{1} + \bar{y}}\right)$$

$$[0080] \quad \theta_2 = \arctan\left(\frac{\bar{x}}{\bar{1} - \bar{y}}\right) \quad (7)$$

[0081] 并且其中 σ_x 为x方向上的应力, p为内部压力, 并且 \bar{x} 、 \bar{y} 、 \bar{L} 、 \bar{L}_1 、 \bar{L}_2 为图2的通过一半高度 $h/2$ 裂缝规范化的坐标和距离。由于 σ_x 在y方向以及x方向上变化, 在裂缝整个

高度上的平均应力可以用在应力投影的计算中。

[0082] 上面给出的解析方程可以用于计算其中一条裂缝作用在相邻的平行裂缝上的平均有效应力并且可以被包括在作用在该裂缝上的有效闭合应力中。

[0083] 对于更复杂的裂缝网络,裂缝可以朝向不同的方向并且彼此相互交叉。图3示出描绘应力投影效应的复杂裂缝网络300。该裂缝网络300包括从井眼304延伸开并且与裂缝网络300中的其它裂缝305相互交叉的水力压裂裂缝303。

[0084] 一种更加通用的方法可以被用于计算从裂缝网络的其余部分中的任意指定的裂缝分支上的有效应力。在UFM中,裂缝之间的机械相互作用可以基于增强的2D位移不连续法(DDM)进行建模(Olson2004),用于计算诱导应力(例如参见图3)。

[0085] 在2D中,平面应变、位移不连续方法(例如参见Crouch,S.L.and Starfield,A.M., Boundary Element Methods in Solid Mechanics,George Allen&Unwin Ltd, London.Fisher,M.K. (1983) (此后被称作Crouch和Starfield1983),其全部内容由此通过引用被结合到这里),可以被用于描述作用在一个裂缝单元上的由所有裂缝单元的张开和剪切位移间断(D_D 和 D_S)诱发的正应力和切应力(σ_n 和 σ_s)。为了说明由于有限裂缝高度而产生的3D效应,可以使用Olson2004来为与如下的2D DDM修正弹性方程相结合的干扰系数 C^{ij} 提供3D修正因子:

$$\begin{aligned}
 [0086] \quad \sigma_n^i &= \sum_{j=1}^N A^{ij} C_{ns}^{ij} D_s^j + \sum_{j=1}^N A^{ij} C_{nn}^{ij} D_n^j \\
 [0087] \quad \sigma_s^i &= \sum_{j=1}^N A^{ij} C_{ss}^{ij} D_s^j + \sum_{j=1}^N A^{ij} C_{sn}^{ij} D_n^j
 \end{aligned} \tag{8}$$

[0088] 其中A为在方程(9)中描述的干扰系数的矩阵,N为考虑了其相互作用的网络中的单元总数,i为所考虑的单元,并且 $j=1, N$ 为网络中的其它单元,它们对于单元i上的应力的影响也被计算;并且其中 C^{ij} 为2D、平面应变弹性干扰系数。这些表达式可以在Crouch和Starfield1983中找到。

[0089] 图3的Elem i和j示意性地描绘了方程(8)中的变量i和j。应用于Elem j的间断 D_s 和 D_n 也在图3中进行描绘。 D_n 可以和裂缝宽度一样大,并且剪切应力 σ_s 如图所示可以是0。Elem j的位移间断在Elem i上产生应力,如所描绘的 σ_n 和 σ_s 。

[0090] Olson2004所给出的3D修正因子可以表述如下:

$$[0091] \quad A^{ij} = 1 - \frac{d_{ij}^\beta}{[d_{ij}^2 + (h/\alpha)^2]^{\beta/2}} \tag{9}$$

[0092] 其中h为裂缝高度, d_{ij} 为单元i和j之间的距离, α 和 β 为拟合参数。方程9示出3D修正因子可能导致当任意两个裂缝单元之间的距离增加时,彼此之间的相互作用发生衰减。

[0093] 在UFM模型中,在每个时间步长,可以计算出由于应力投影效应所引起的附加诱导应力。可以假设在任意时间,裂缝宽度等于法向位移间断(D_n)并且在裂缝表面的剪切应力为零,即 $D_n^j = w_j, \sigma_s^i = 0$ 。将这两个条件代入方程8,可以得出剪切位移间断(D_s)和在每个裂缝单元(σ_n)上诱导的应力。

[0094] 应力投影诱导的应力对裂缝网络扩展模式的影响可以分两层来描述。首先,在压

力和宽度迭代过程中,每个裂缝单元上的初始原处应力可以通过增加由于应力投影效应而产生的附加正应力而被修正。这可能直接影响裂缝压力和宽度分布,导致压裂发展发生改变。其次,通过包含应力投影诱导应力(正向和切向应力),位于扩展端部前方的局部应力场也可以被改变,这可能使得局部主应力方向从初始的原处应力方向偏离。该改变后的局部主应力方向可以导致裂缝从其初始扩展平面发生转向并且可能进一步影响裂缝网络扩展模式。

[0095] 应力投影模型的确证

[0096] 对于双翼裂缝情形的UFM模型的确证例如可以使用Weng2011或者Kresse2011进行。还可以使用应力投影建模方法进行验证。例如,可以将使用2D DDM的结果与Itasca Consulting Group Inc.,2002,FLAC3D(Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions),Version 2.1,Minneapolis:ICG(2002)(此后被称作“Itasca,2002”)给出的Flac3D进行比较。

[0097] 增强的2D DDM与Flac3D的对比

[0098] Olson2004提出的3D修正因子包括两个经验常数 α 和 β 。可以通过将对具有无限长度和有限高度的平面应变裂缝的由数值方法(增强的2DDDM)获得的应力与由解析方法获得的应力进行对比而对 α 和 β 的值进行校准。可以进一步通过对具有有限长度和高度的两个平行直线裂缝的2DDDM结果与例如使用FLAC3D进行完整的三维数值方法获得的结果进行对比而对该模型进行确证。

[0099] 确证问题在图4中示出。图4的示意图400将用于两个平行直线裂缝的增强2D DDM和Flac3D进行对比。如图400所示,两个平行的裂缝407.1、407.2经受沿着x、y坐标轴的应力 σ_x 、 σ_y 。裂缝分别具有长度 $2L_{xf}$ 以及压裂压力 p_1 、 p_2 。裂缝的间隔距离为 s 。

[0100] 裂缝在Flac3D中可以被模拟成两个表面处于相同位置但是具有独立的网格点。恒定的内部流体压力作为正应力被施加到网格上。裂缝还要经受间接应力 σ_x 和 σ_y 。两个裂缝具有相同的长度和高度,其中高度/一半长度的比值为0.3。

[0101] 可以沿着x-轴($y=0$)和y-轴($x=0$)对应力进行对比。两条相距很近的裂缝($s/h=0.5$)可以被模拟成如图5.1-5.3所示的对比。这些图给出了拓展的2D DDM和Flac3D的对比:沿着x-轴($y=0$)和y-轴($x=0$)的应力对比。

[0102] 这些图分别包括曲线图500.1、500.2、500.3,分别示出延伸的裂缝2DDDM和Flac3D的沿着y-轴的 σ_y ,沿着y-轴的 σ_x ,以及沿着x-轴的 σ_y 。图5.1使用2D DDM和Flac3D绘制出 σ_y/p (y-轴)与距离裂缝的规范化距离(x-轴)之间的曲线图。图5.2使用2D DDM和Flac3D绘制出 σ_x/p (y-轴)与距离裂缝的规范化距离(x-轴)之间的曲线图。图5.3使用2D DDM和Flac3D绘制出 σ_y/p (y-轴)与距离裂缝的规范化距离(x-轴)之间的曲线图。裂缝端部的位置 L_f 被描绘成沿着线 x/h 。

[0103] 如图5.1-5.3所示,采用3D修正因子的增强的2D DDM方法所模拟出的应力与采用完全3D模拟得出的结果非常吻合,这意味着修正因子能够在应力场的裂缝高度上获得3D效果。

[0104] 与CSIRO模型的对比

[0105] 结合有增强的2D DDM方法的UFM模型可以通过采用CSIRO对完全2D DDM模拟器进行修改而得到验证(例如参见Zhang,X.,Jeffrey,R.G.,and Thiercelin,

M.2007.Deflection and Propagation of Fluid-Driven Fractures at Frictional Bedding Interfaces:A Numerical Investigation.Journal of Structural Geology, 29:396-410, (此后被称作“Zhang2007”)其全部内容由此通过引用而被结合到这里)。这种方法例如可以用于裂缝非常高、2D DDM方法无法考虑裂缝高度的3D效果的这种受限的情况中。

[0106] 可以对两个邻近扩展的裂缝对彼此扩展路径的影响进行比较。两个初始彼此平行的水力压裂裂缝的扩展(沿着局部最大应力方向的扩展)可以被模拟成如下形式,例如:1)起始点位于彼此的顶部并且彼此各向同性地偏移;以及2)各向异性的远场应力。裂缝扩展路径和每个裂缝内部的压力可以关于UFM和CSIRO编码对表1给出的输入数据进行对比。

[0107]

注射流量	0.106m ³ /s	40bbl/min
应力各向异性	0.9MPa	130psi
杨氏模量	3×10 ¹⁰ Pa	4.35e+6psi
泊松比	0.35	0.35
流体粘性	0.001pa·s	1cp
流体比重	1.0	1.0
最小水平应力	46.7MPa	6773psi
最大水平应力	47.6MPa	6903psi
裂缝韧度	1MPa·m ^{0.5}	1000psi/in ^{0.5}
裂缝高度	120m	394ft

[0108] 表1 对CSIRO模型进行确证的输入数据

[0109] 当两条裂缝起始时彼此平行并且起始点间隔dx=0,dy=33ft(10.1m)时(最大水平应力场沿x-方向定向),由于应力投影效应它们可能转向彼此分开。

[0110] 各向同性和各向异性应力场的扩展路径在图6.1和6.2中示出。这些图为分别描绘两条初始平行的裂缝609.1、609.2在各向同性和各向异性应力场中的扩展路径的曲线图600.1、600.2。裂缝609.1和609.2初始平行地接近于注射点615.1、615.2,但是随着它们从那里延伸出去而发生分叉。与各向同性的情况相比,裂缝在应力各向异性情况下的曲率被描绘成更小。这可能是由于趋于使裂缝彼此分离的应力投影效应与推动裂缝在最大水平应力(x-方向)上扩展的远场应力之间的竞争引起的。远场应力的影响随着裂缝之间距离的增加而变得显著,在这种情况下,裂缝可能趋于平行于最大水平应力方向扩展。

[0111] 图7.1和7.2描绘了曲线图700.1、700.2,示出一对分别从不同的注射点711.1、711.2开始的裂缝。这些图示出当裂缝从间隔距离为dx=dy=(10.1m)的点开始时在各向同性和各向异性应力场中的对比。在这些图中,裂缝709.1、709.2趋于朝向彼此扩展。相似类型表现例子已经在实验室研究中被发现(例如参见Zhang2007)。

[0112] 如上面所指出的,在UFM模型中采用的增强的2D DDM方法能够获得有限裂缝高度在裂缝相互作用和扩展模式上的3D效果,同时在计算上也是高效的。能够提供用于垂直水力压裂裂缝网络和裂缝扩展方向(模式)的应力场的良好评估。

[0113] 案例

[0114] 案例#1水平井中的平行裂缝

[0115] 图8为示意图800,示出平行的横断裂缝811.1、811.2、811.3分别从多个围绕水平井眼804的射孔群815.1、815.2、815.3中同时地扩展。裂缝811.1、811.2、811.3中的每一个提供不同的流量 q_1 、 q_2 、 q_3 ,其为在压力 p_0 下的总流量 q_t 的一部分。

[0116] 当对于所有的裂缝来说地层条件和井孔都相同时,如果在射孔群之间的井眼中的摩擦压力占比很小,那么裂缝可能具有大致相同的尺寸。这可以假定成裂缝被分隔开足够远并且应力投影效应可被忽略。当裂缝之间的间隔位于应力投影影响的区域内时,裂缝可能不仅在宽度上受影响,而且还在其它裂缝尺寸上受影响。为了对此进行描述,可以对具有五条平行裂缝的简单情况进行考虑。

[0117] 在该例子中,裂缝被假定为具有恒定的高度100ft (30.5m)。裂缝之间的间隔为65ft (19.8m)。其它输入参数在表2中给出。

杨氏模量	$6.6 \times 10^6 \text{ psi} = 4.55e+10 \text{ Pa}$
泊松比	0.35
流量	12.2 bbl/min = 0.032 m ³ /s
粘性	300cp = 0.3Pa·s
高度	100 ft = 30.5 m
渗漏系数	$3.9 \times 10^{-2} \text{ m/s}^{1/2}$
应力各向异性	200 psi = 1.4 Mpa
裂缝间隔	65 ft=19.8 m
每条裂缝的射孔数(No. of perfs per frac)	100

[0118] 表2 案例#1的输入参数

[0120] 对于这种简单情况,传统的用于多条裂缝的Perkins-Kern-Nordgren (PKN) 模型(例如参见Mack, M.G. and Warpinski, N.R., Mechanics of Hydraulic Fracturing. Chapter 6, Reservoir Stimulation, 3rd Ed., eds. Economides, M.J. and Nolte, K.G. John Wiley & Sons (2000))可以通过结合方程6给出的应力投影计算而被修正。闭合应力的增加通过将方程6计算的应力在整个裂缝上进行平均来近似。注意到这种简化的PKN模型由于应力投影效应而不能模拟裂缝转向。这种简单模型的结果可以与结合有沿着整个裂缝路径还有裂缝转向逐点进行的应力投影计算的UFM模型进行比较。

[0121] 图9示出从两种模型得出的五条裂缝的裂缝长度的模拟结果。图9为描绘五条平行裂缝在注射过程中长度(y-轴)随着时间(t)变化的曲线图900。线917.1-917.5是UFM模型产生的。线919.1-919.5是简化的PKN模型产生的。

[0122] 图9中UFM模型得到的五条裂缝的裂缝形状和宽度的轮廓在图10中示出。图10为描绘围绕井眼1004的裂缝1021.1-1021.5的示意图1000。

[0123] 裂缝1021.3为五条裂缝中间的一条,并且裂缝1021.1和1021.5为最边上的两条。由于裂缝1021.2、1021.3以及1021.4由于应力投影效应而比外边的两条裂缝具有更小的宽

度,因此它们可能具有更大的流阻,容纳更少的流量,并且具有更短的长度。因此,应力投影在动态条件下不仅仅影响裂缝宽度而且还影响裂缝长度。

[0124] 应力投影效应可以通过许多参数对裂缝的几何形状产生影响。为了示出这些参数的效果,对于变化的裂缝间隔、射孔摩擦以及应力各向异性的情况下计算出的裂缝长度在表3中示出。

[0125] 图11.1和11.2示出由UFM预测的在大射孔摩擦和大裂缝间隔(例如,大约120ft(36.6m))情况下的裂缝形状。图11.1和11.2为描绘围绕井眼1104的五条裂缝1123.1-1123.5的示意图1100.1和1100.2。当射孔摩擦很大时,能够提供均匀地将流量分配到全部的射孔群里的巨大偏移力。因此,可以克服应力投影并且如图11.1所示由此产生的裂缝长度可以变得近似相等。当裂缝间隔很大时,应力投影效应可以消散,并且如图11.2所示裂缝具有大致相同的尺寸。

[0126]

裂缝	基本案例 (Base case)	120 ft 间隔 (36.6 m)	射孔数= 2	各向异性 = 50 psi (345000Pa)
1	133	113	105	111
2	93	104	104	95
3	83	96	104	99
4	93	104	100	95
5	123	113	109	102

[0127] 表3 各种参数对裂缝形状的影响

[0128] 案例#2复杂裂缝

[0129] 在图12的例子中,UFM模型可以被用于模拟页岩中水平井的4-阶段水力压裂处理。例如参见Cipolla,C,Weng,X.,Mack,M.,Ganguly,U.,Kresse,O.,Gu,H.,Cohen,C and Wu,R.,Integrating Microseismic Mapping and Complex Fracture Modeling to Characterize Fracture Complexity.Paper SPE 140185presented at the SPE Hydraulic Fracturing Conference and Exhibition,Woodlands,Texas,USA,January24-26,2011(此后被称作“Cipolla2011”),其全部内容由此通过引用被结合到这里。该井可以被包围住并且用水泥浇筑,并且每一阶段泵送通过三或四个射孔群。四个阶段中的每一个阶段包括大约25,000bbls(4000m³)的流体和440,000lbs(2e+6kg)的支撑剂。广泛数据对于井是可用的,包括提供最小和最大水平应力的估测的先进的声波测井。微地震测绘数据对于各个阶段都是可用的。例如参见Daniels,J.,Waters,G.,LeCalvez,J.,Lassek,J.,and Bentley,D.,Contacting More of the Barnett Shale Through an Integration of Real-Time Microseismic Monitoring,Petrophysics,and Hydraulic Fracture Design.Paper SPE110562presented at the2007SPE Annual Technical Conference and Exhibition,Anaheim,California,USA,October12-14,2007。该例子在图12中示出。图12为描绘围绕井眼1204的各阶段微震活动1223的微震测绘图。

[0130] 由先进的声波测井得到的应力各向异性表明井的前段比尾段具有更高的应力各向异性。先进的3D地震分析表明占优势的天然裂缝走向从前段的NE-SW向横向的尾段的NW-SE改变。例如参见Rich, J.P. and Ammerman, M., Unconventional Geophysics for Unconventional Plays. Paper SPE131779 presented at the Unconventional Gas Conference, Pittsburgh, Pennsylvania, USA, February 23-25, 2010, 其全部内容由此通过引用整体被结合到这里。

[0131] 模拟结果可能基于UFM模型而不结合完全的应力投影计算(例如参见Cipolla 2011), 包括切应力和裂缝转向(例如参见Weng 2011)。该模拟可以升级成具有这里提供的完全应力模型。图13.1-13.4分别示出模拟的围绕井眼1304的裂缝网络1306在全部四个阶段的平面视图, 以及它们分别与微地震测量结果1323.1-1323.4的对比。

[0132] 从图13.1-13.4的模拟结果可以看出, 对于阶段1和2, 紧密间隔的裂缝没有显著地偏移。这可能是因为在井眼的前段具有高的应力各向异性。对于阶段3和4, 应力各向异性较低, 能够看到由于应力投影效应而具有更大的裂缝偏移。

[0133] 案例#3多阶段例子

[0134] 案例#3示出前面阶段的应力投影如何能够影响下个处理阶段的水力压裂网络的扩展模式, 导致第四处理阶段产生的水力压裂网络的全部图像发生变化。

[0135] 该案例包括四个水力压裂处理阶段。井被包围并且浇筑水泥。阶段1和2被泵送通过三个射孔群, 并且阶段3和4被泵送通过四个射孔群。岩石组构为各向同性的。输入参数在下面的表4中列出。没有考虑或考虑了来自前面阶段的应力投影的整个水力压裂网络的顶视图在图13.1-13.4中示出。

[0136]

杨氏模量	$4.5 \times 10^6 \text{psi} = 3.1 \text{e} + 10 \text{Pa}$
泊松比	0.35
流量	$30.9 \text{bpm} = 0.082 \text{m}^3/\text{s}$
粘性	$0.5 \text{cp} = 0.0005 \text{pa} \cdot \text{s}$
高度	$330 \text{ft} = 101 \text{m}$
泵送时间	70min

[0137] 表4 案例#3的输入参数

[0138] 图14.1-14.4为描绘压裂操作过程中在各个阶段的裂缝网络1429的示意图1400.1-1400.4。图14.1示出处理之前的离散的裂缝网络(DFN) 1429。图14.2描绘出第一处理阶段之后的模拟DFN1429。DFN1429具有由于第一处理阶段而从其开始扩展的水力压裂裂缝(HFN) 1431。图14.3示出描绘有分别在四个阶段扩展、但是没有考虑前面阶段影响的模拟HFN1431.1-1431.4的DFN。图14.4示出描绘有在四个阶段扩展但是考虑了前面阶段的压裂、应力投影和HFN的HFN1431.1、1431.2'-1431.4'的DFN。

[0139] 当各个阶段单独地生成, 它们可能如图14.3所示无法看到彼此。当各个阶段的应力投影和HFN都如图14.4所示被考虑进去时, 扩展模式可能改变。如图14.3和14.4所示, 第一阶段产生的水力压裂裂缝1431.1对于各种情况都是相同的。第二阶段1431.2扩展模式可能受第一阶段的应力投影以及新的DFN(包括阶段1的HFN1431.1)的影响, 导致扩展模式变化成HFN1431.2'。HFN1431.1'开始跟随在阶段1产生的HFN1431.1同时两者相互依赖。第三

阶段1431.3跟随在第二阶段处理1431.2、1431.2'产生的水力压裂,并且由于如1431.3与1431.3'的对比所指示的阶段2的应力投影效应而不会扩展很远。当阶段4(1431.4)可能时,其趋于从阶段3转移离开,但是当其与前阶段的HFN1431.3'相遇时可能跟随前阶段的HFN1431.3'并且如图14.4被描绘成HFN1431.4'。

[0140] 提出一种计算复杂水力压裂网络中的应力投影的方法。该方法包括具有对有限裂缝高度进行修正的增强2D或3D位移不连续法。该方法可以用于估算复杂裂缝网络中不同裂缝分支之间的相互作用以用于解决基本的3D裂缝问题。这种应力投影计算可以结合到UFM——一种复杂裂缝网络中。两条裂缝的简单情况的结果显示裂缝彼此之间既可能吸引也可能排斥,取决于它们初始的相对位置,并且可以与独立的2D非平面水力压裂模型相媲美。

[0141] 水平井的多条平行裂缝的模拟可以用于确认两条最外边的裂缝变化更加显著,同时由于应力投影效应,内部的裂缝具有减小的裂缝长度和宽度。这种变化还取决于其他参数,例如射孔摩擦和裂缝间隔。当裂缝间隔大于裂缝高度时,应力投影效应可能消散并且在多条裂缝之间具有细微的差别。当射孔摩擦很大时,可以提供足够的偏移以在射孔群之间均匀地分配流量,并且尽管有应力投影效应,裂缝尺寸仍然可以变得大致相同。

[0142] 当创建复杂裂缝时,如果地层具有小的应力各向异性,裂缝相互作用可能导致裂缝发生显著的偏移,它们趋向于彼此排斥。另一方面,对于大的应力各向异性,可能具有有限的裂缝偏移,其中应力各向异性抵消由于应力投影产生的裂缝转向效应,并且裂缝被迫使向着最大应力的方向前进。不考虑裂缝偏移的量,应力投影对裂缝宽度具有影响,其可能影响分配到多个射孔群的注射量,以及整个裂缝网络覆盖的区域和支撑剂布置。

[0143] 图15为描绘在井场执行压裂操作的方法1500的流程图,井场例如是图1.1的井场100。井场围绕地下地层设置,地层具有贯穿它的井眼和位于其中的裂缝网络。裂缝网络具有如图1.1和1.2所示的天然裂缝。该方法(1500)包括(1580)通过将具有支撑剂的注射流体注入裂缝网络以形成水力压裂网络而执行井场的增产操作。在某些情况下,这种增产可以在井场或通过模拟进行。

[0144] 该方法包括(1582)获得井场数据和地下地层的地质力学模型。井场数据包括对模拟有用的关于井场的任何数据,例如天然裂缝的天然裂缝参数、裂缝网络的图像等等。天然裂缝参数例如可以包括密度定向、分布以及力学特性(例如摩擦系数、粘结力、裂缝韧度等等)。裂缝参数可以通过对井孔成像记录直接观察获得、通过3D微地震估算、蚂蚁追踪、声波各向异性、地质层曲率、微地震活动或图像获得。获得裂缝参数的技术的例子在PCT/US2012/48871和US2008/0183451中给出,其全部内容由此通过引用被结合到这里。

[0145] 图像例如可以通过观察井孔成像记录、通过井眼勘测估计裂缝尺寸、获得微地震图像和/或类似方法来获得。裂缝尺寸可以通过评估地震测量、蚂蚁追踪、声波测量、地质测量和/或类似方法估测。其他井场数据还可以通过各种来源(例如井场测量、历史数据、假设)等生成。这种数据例如可以包括完井数据、地质结构数据、岩石物性数据、地质力学数据、测井测量数据和其它形式的数据。地球力学模型可以通过使用传统技术获得。

[0146] 该方法(1500)还包括(1584)生成随着时间变化的水力压裂裂缝发展模式,例如在增产操作过程中。图16.1-16.4描绘了一种生成水力压裂裂缝发展模式的例子(1584)。如图16.1所示,在其初始状态,具有天然裂缝1623的裂缝网络1606围绕地下地层1602设置,地下

地层1602具有贯穿它的井眼1604。随着支撑剂从井眼1604被注入到地下地层1602,来自支撑剂的压力产生围绕井眼1604的水力压裂裂缝1691。该水力压裂裂缝1691沿着 L_1 和 L_2 延伸进入地下地层(图16.2),并且随着时间变化遇到裂缝网络1606.1中的其它裂缝,如图16.2-16.3所示。与其它裂缝接触的点为交叉点1625。

[0147] 该生成(1584)包括(1586)使水力压裂从井眼延伸并且进入地下地层的裂缝网络以形成包括天然裂缝和水力压裂裂缝的水力压裂网络,如图16.2所示。裂缝发展模式基于天然裂缝参数和地下地层的最小应力和最大应力。该生成还包括:(1588)确定水力压裂裂缝的水力压裂参数(例如,压力 p 、宽度 w 、流量 q 等);(1590)确定支撑剂通过水力压裂网络的传输参数;以及(1592)例如通过所确定的水力压裂参数、所确定的传输参数和地质力学模型来确定水力压裂的裂缝尺寸(例如,高度)。水力压裂参数可以在延伸之后确定。该确定(1592)还可以通过采用支撑剂传输参数、井场参数和其它参数进行。

[0148] 该生成(1584)可包括基于例如在Koutsabeloulis and Zhang, 3D Reservoir Geomechanics Modeling in Oil/Gas Field Production, SPE Paper 126095, 2009 SPE Saudi Arabia Section Technical Symposium and Exhibition held in Al Khobar, Saudi Arabia, 9-11 May, 2009中描述的地质力学模型的模拟地层特性。该生成还可包括通过使用作为建模软件、例如UFM输入的井场数据、裂缝参数和/或图像建立压裂操作的模型,以在裂缝网络中生成连续的诱导水力压裂裂缝图像。

[0149] 该方法(1500)还包括:(1594)在水力压裂裂缝上执行应力投影以确定水力压裂裂缝之间(或与其它裂缝)的应力干涉,和(1598)基于应力投影和/或所确定的水力压裂裂缝之间的应力干涉而重复该生成(1584)。可以执行该重复以说明可影响裂缝发展的裂缝干涉。应力投影可包括执行例如用于每条水力压裂裂缝的2D或3D DDM以及更新随着时间变化的裂缝发展模式。裂缝发展模式可以根据应力投影垂直于局部主应力方向扩展。裂缝发展模式可包括天然和水力压裂裂缝在整个裂缝网络中的影响(见图16.3)。

[0150] 可以对井场的多个井眼执行应力投影。各个井眼的应力投影可以被组合以像确定每个井眼那样确定裂缝的相互作用。该生成对为多个井眼中的一个或多个所执行的每个应力投影都可以重复。该生成对多个井眼提供的增产所执行的应力投影也可以重复。还可以在具有各种数据组合的相同的井眼上执行多种模拟,并且如期望的进行比较。历史数据或其它数据也可以被输入到该生成中以为最终结果中的考虑提供多个信息来源。

[0151] 该方法还包括:(1596)如果水力压裂裂缝遇到另一条裂缝,则确定在水力压裂裂缝和遇到的裂缝之间的交叉特性,和(1598)如果水力压裂裂缝遇到一条裂缝则基于交叉特性重复该生成(1584)(例如参见图16.3)。交叉特性例如可以使用PCT/US2012/059774的技术,其全部内容由此被整体结合到这里。

[0152] 确定交叉特性可包括执行应力投影。当水力压裂裂缝遇到裂缝时,根据向下打眼的条件,裂缝发展模式可不变或发生改变。当压裂压力大于作用在遇到的裂缝上的应力时,裂缝发展模式可沿着遇到的裂缝扩展。该裂缝发展模式可沿着遇到的裂缝扩展直到到达天然裂缝的端部。该裂缝发展模式在天然裂缝的端部可改变方向,且裂缝发展模式在天然裂缝端部上沿垂直于最小应力的方向延伸,如图16.4所示。如图16.4所示,水力压裂裂缝依据局部应力 σ_1 和 σ_2 在新的路径1627上延伸。

[0153] 可选地,该方法(1500)还可包括(1599)确证裂缝发展模式。该确证可通过将得到

的发展模式与其它数据、例如如图7.1和7.2所示的微地震图像进行对比而实现。

[0154] 该方法可以以任意的顺序执行并且按照期望进行重复。例如，生成步骤(1584)–(1599)可以随时间重复，例如通过随着裂缝网络变化而进行迭代。可以执行该生成(1584)以更新在该生成过程中执行的迭代模拟来说明多个裂缝的相互作用和影响，因为裂缝网络随着时间而被激发。

[0155] 尽管本公开已经参照典型的实施例和其执行方式进行了描述，本公开不受限于或者不局限于这些典型实施例和/或执行方式。相反，本公开的系统和方法容许在不脱离本公开的精神和范围的情况下的各种修改、变化和/或增强。因此，本公开明显地将全部的这些修改、变化和增强包括在其范围之内。

[0156] 应该注意到任何这种实际实施例或者多种执行方式的发展中，必须做出具体的判定以实现研发者具体的目标，例如符合系统相关且商业关联的要求，其将在一种执行方式到另一种之间变化。此外，应当意识到这种发展努力可能是复杂并且耗时的，但是对于享有本公开的利益的本领域的普通技术人员来说是常规的工作。此外，这里使用/公开的实施例还包括引用之外的一些要素。

[0157] 在该说明书中，每个数值都应当以被术语“大约”修饰来读取一次(除非已经明显地如此修饰)，然后按没有如此修饰地再次读取，除非在上下文中另有说明。同样，在本说明书中，应该理解的是，被列出或描述成有用的、合适的任何范围或类似物意味着位于该范围之内的任何和每个值、包括端点都被认为是已经作出了声明。例如，“从1到10的范围”被理解为表示沿着大约1和大约10之间的连续区间的各个和每个可能的数。因此，即使位于范围内的具体数据点，或者甚至在范围内没有数据点，都是明确确定的或者仅指代一些具体的点，可以理解为发明者意识和理解到该范围内的全部数据点都被认为是具体指明，并且发明者掌握整个范围以及位于该范围内的全部点的知识。

[0158] 这里做出的说明仅提供与本公开相关的信息并且不构成现有技术，并且可以描述说明本发明的一些实施例。这里引用的全部参考文件通过引用整体被结合到当前的申请中。

[0159] 尽管上面详细描述了少量典型的实施例，本领域技术人员可以容易地意识到典型实施例可以进行许多修改而不会实质上脱离执行井眼增产操作的系统和方法。因此，全部的这些改变都是被包括在如后面的权利要求限定的本公开的范围之内。在权利要求书中，功能性限定从句用于覆盖这里描述的执行列举的功能的结构并且不仅仅是结构性等价物，而且还是等价性结构物。因此，尽管钉子和螺丝可能不是结构性等价物，因为钉子采用柱面将木质部件固定到一起，而螺丝采用螺旋面，但是在固定木质部件的条件下，钉子和螺丝可以是等价性结构物。本申请的明确目的在于不援引35U.S.C. §112第6段对这里的权利要求作任何限定，除非在权利要求中明确地将词语“用于…的装置”和相关的功能一起使用。

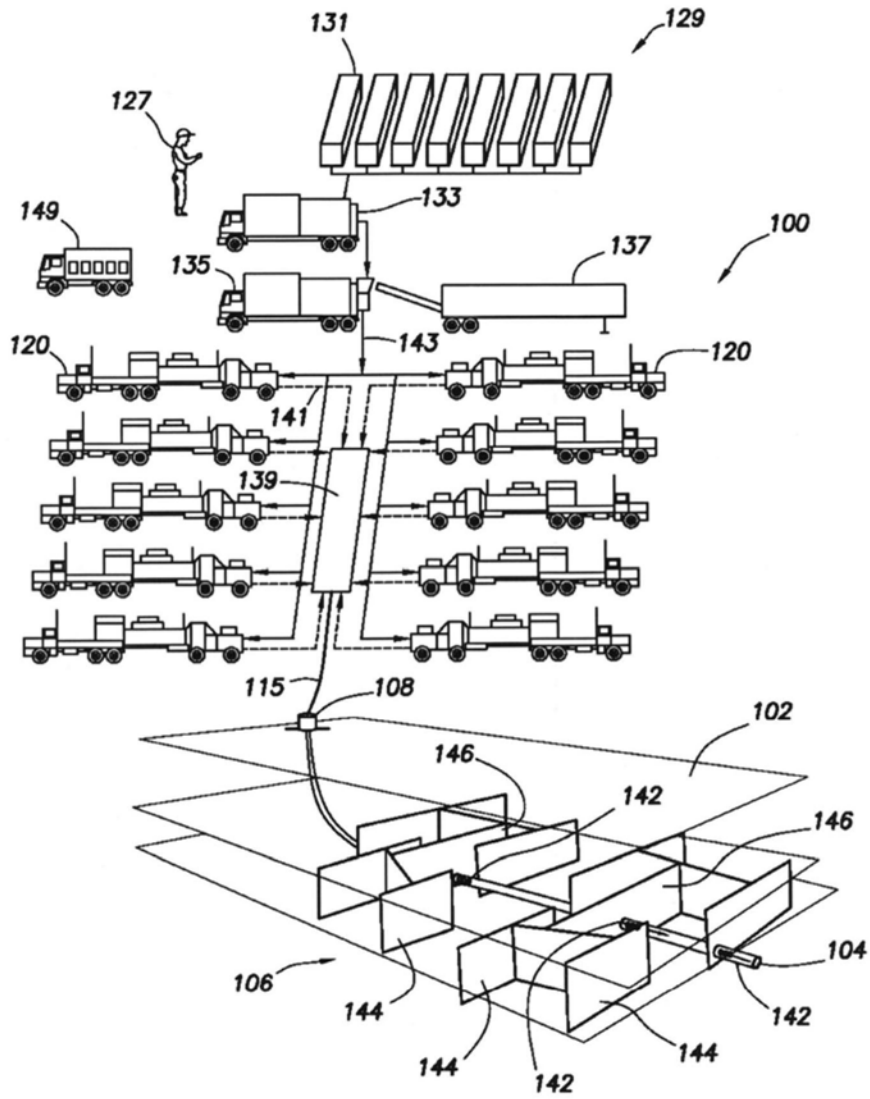


图1.1

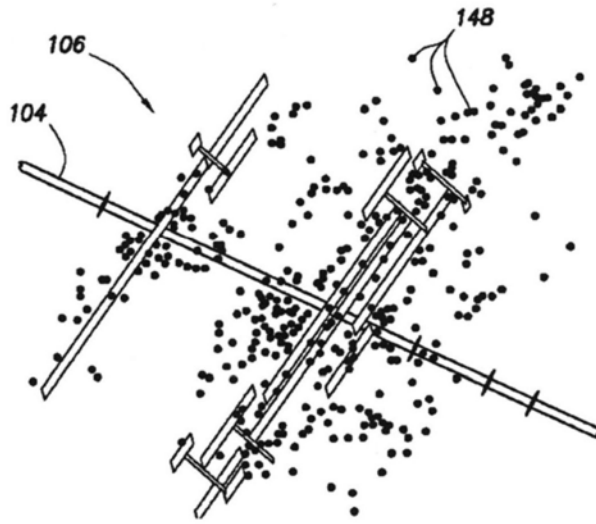


图1.2

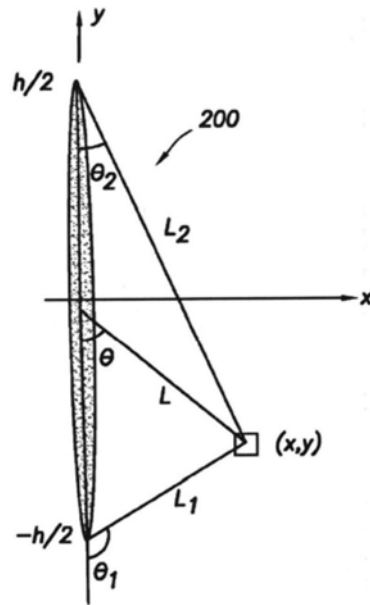


图2

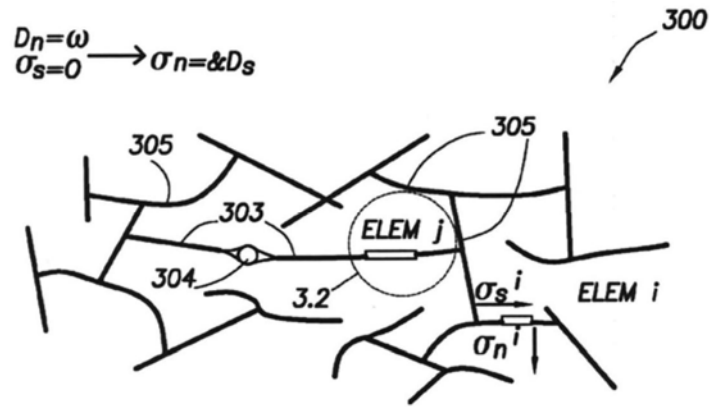


图3.1

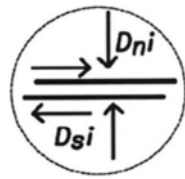


图3.2

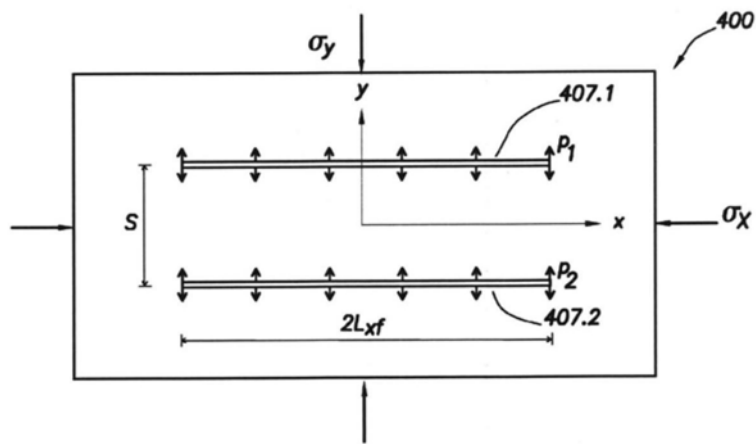


图4

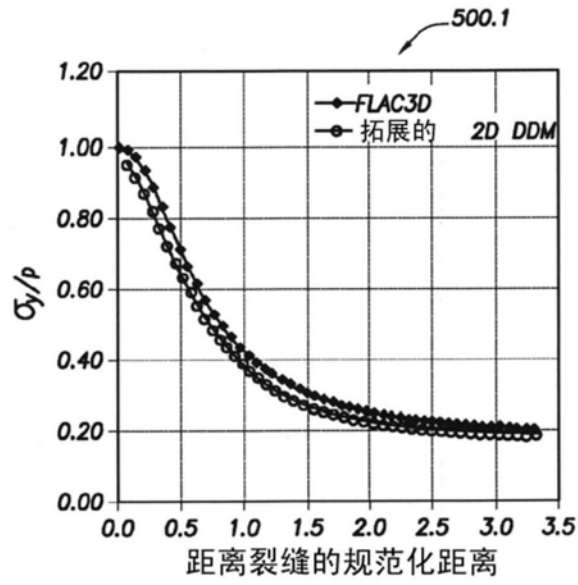


图5.1

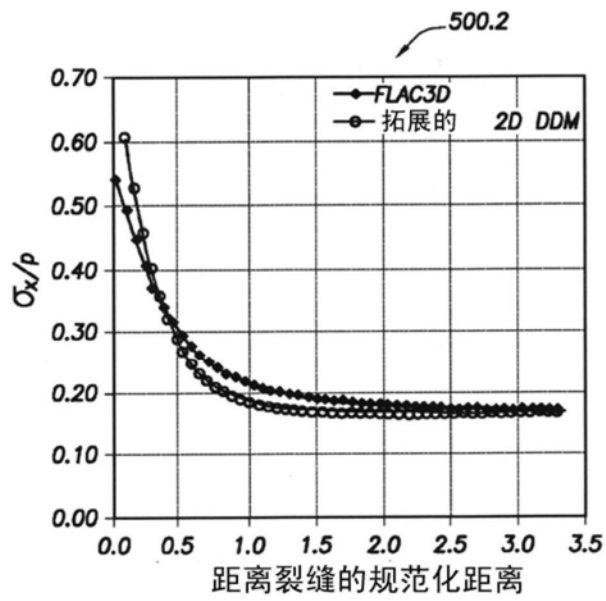


图5.2

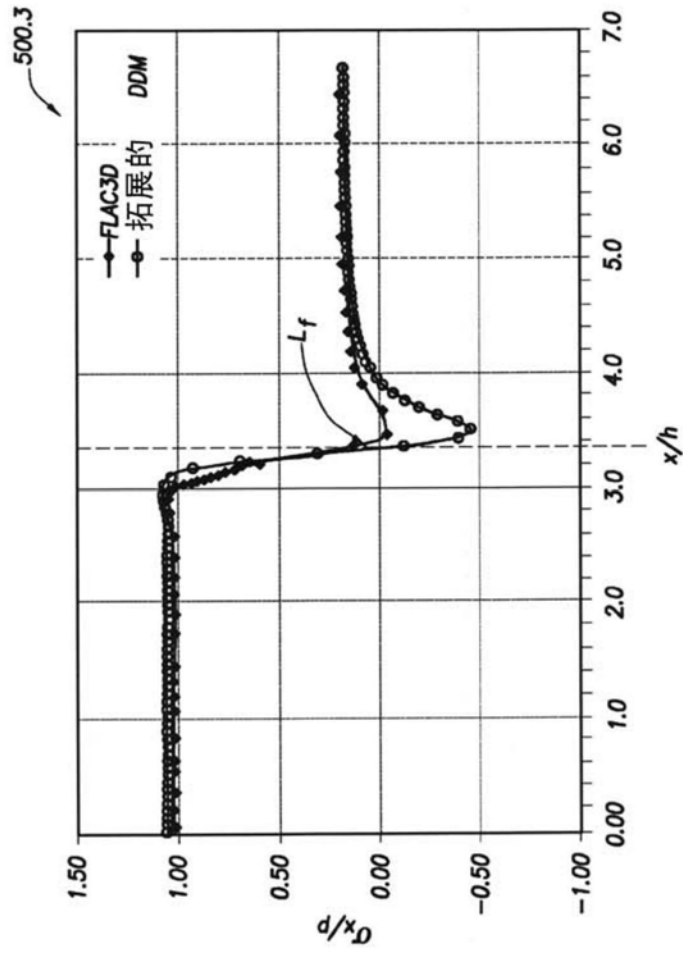


图5.3

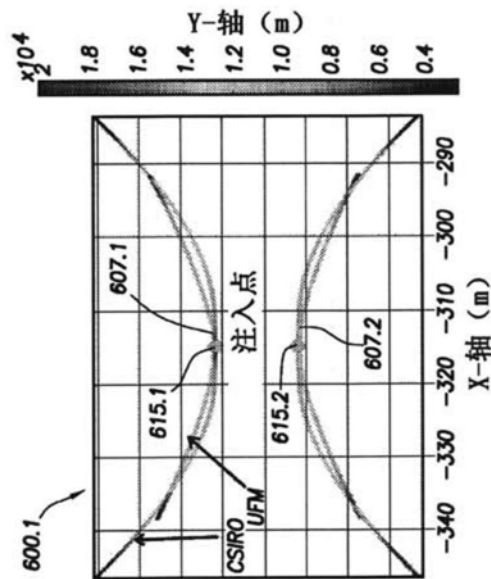


图6.1

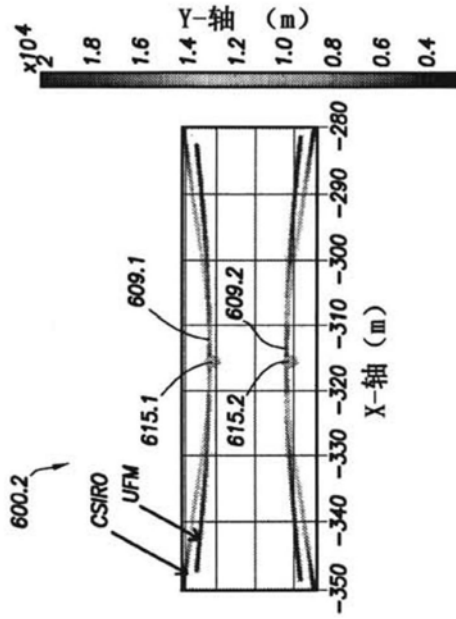


图6.2

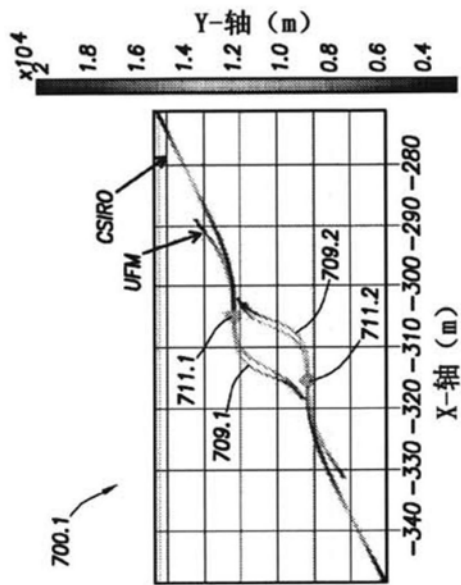


图7.1

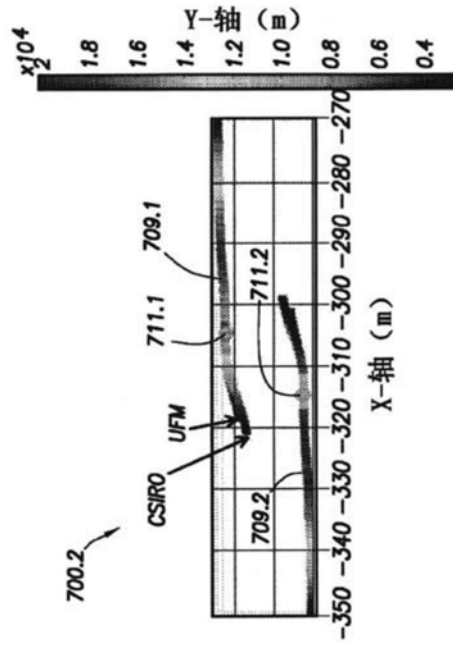


图7.2

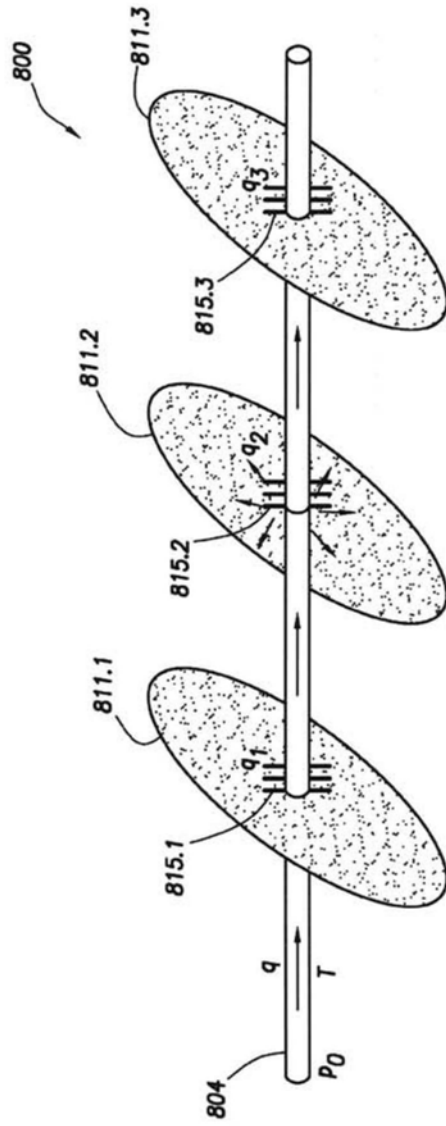


图8

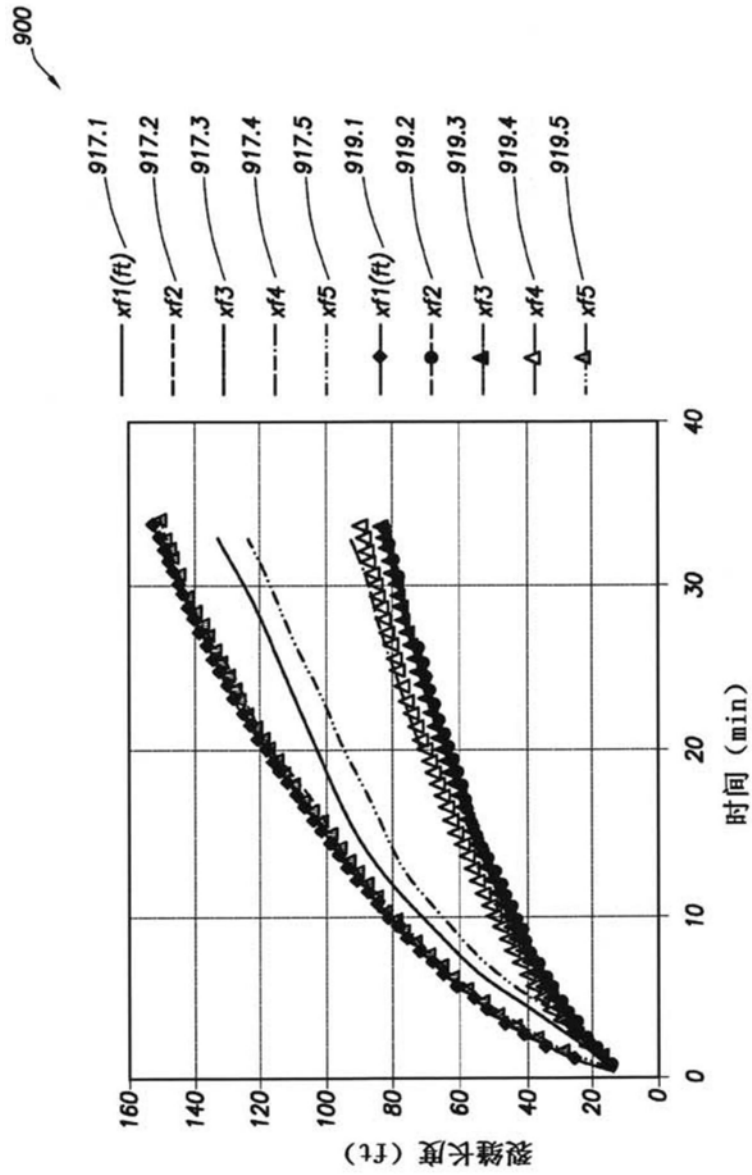


图9

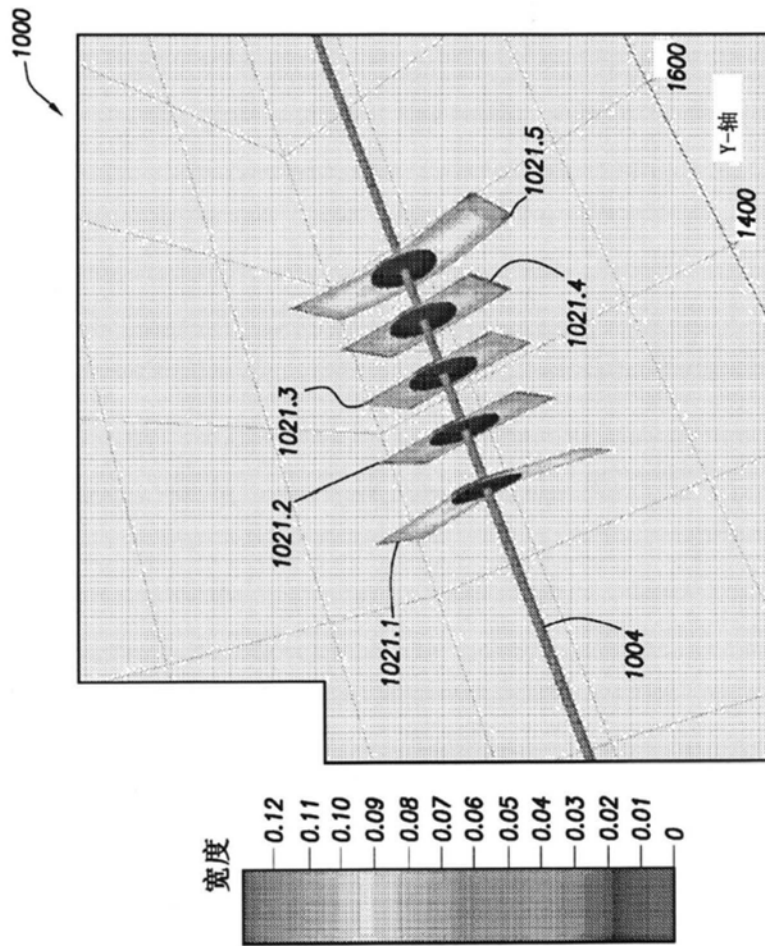


图10

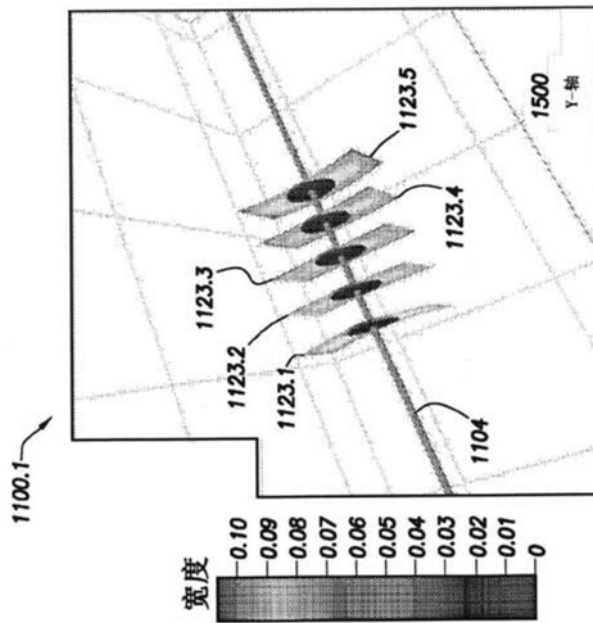


图11.1

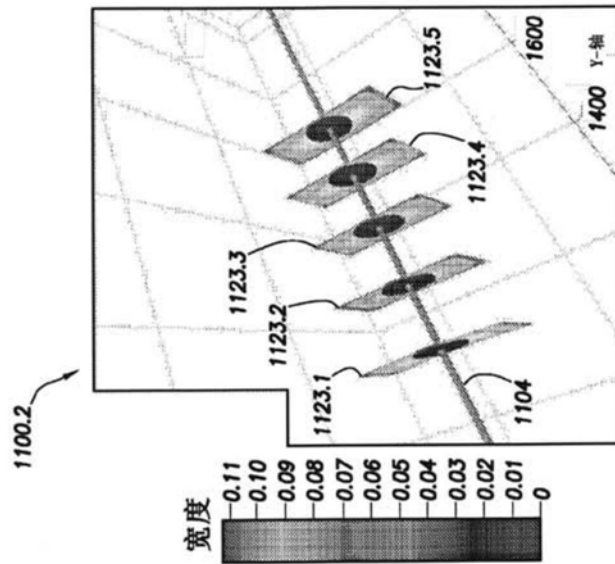


图11.2

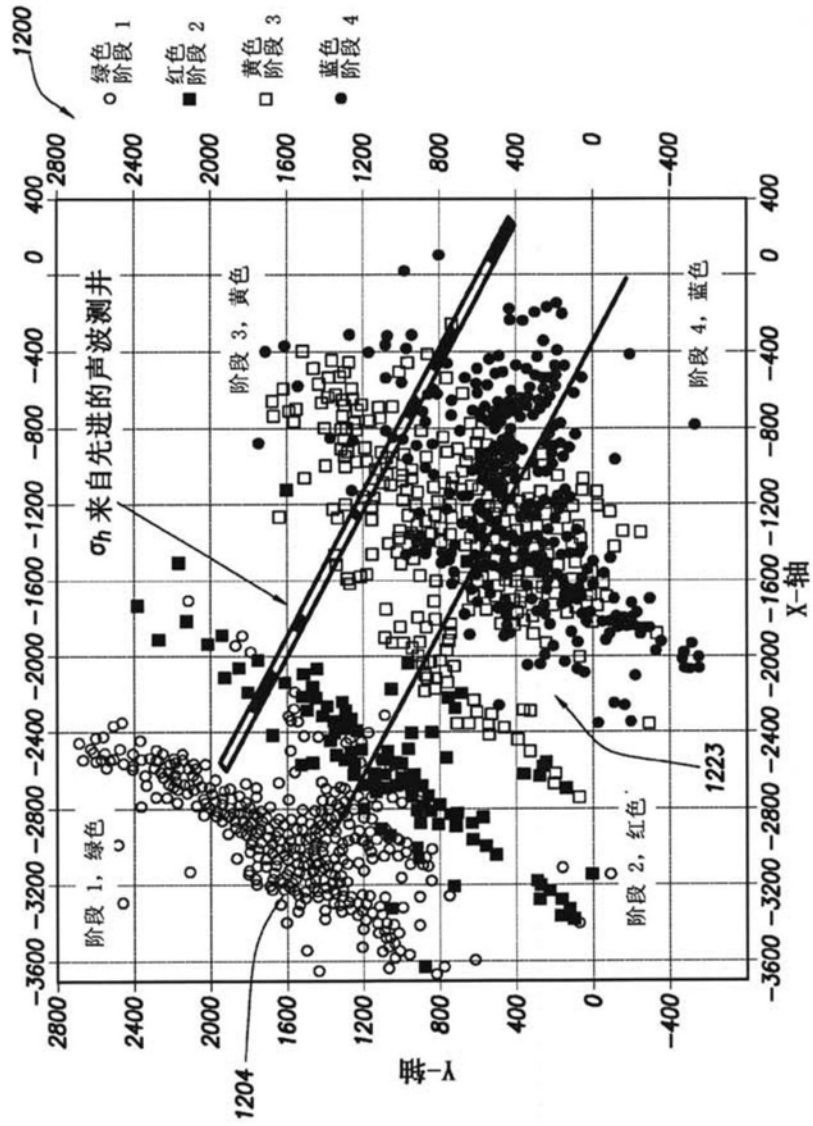


图12

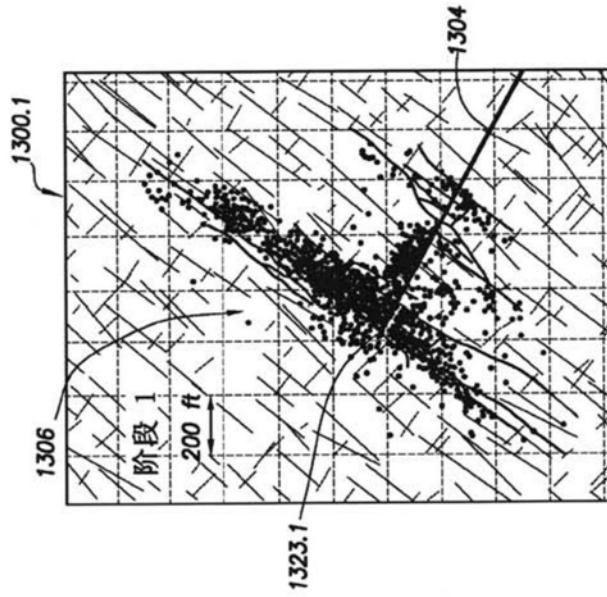


图13.1

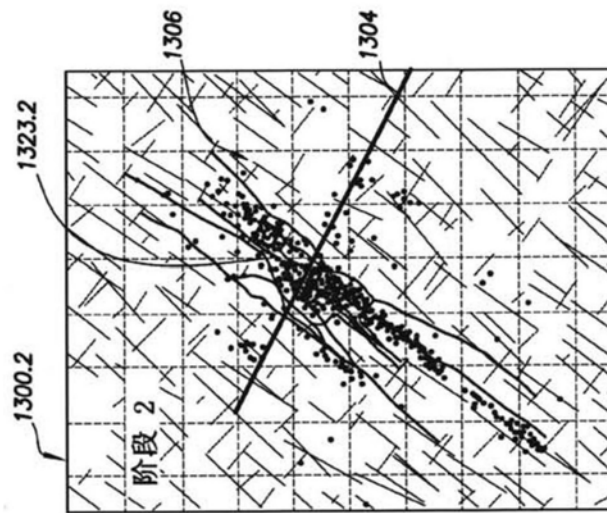


图13.2

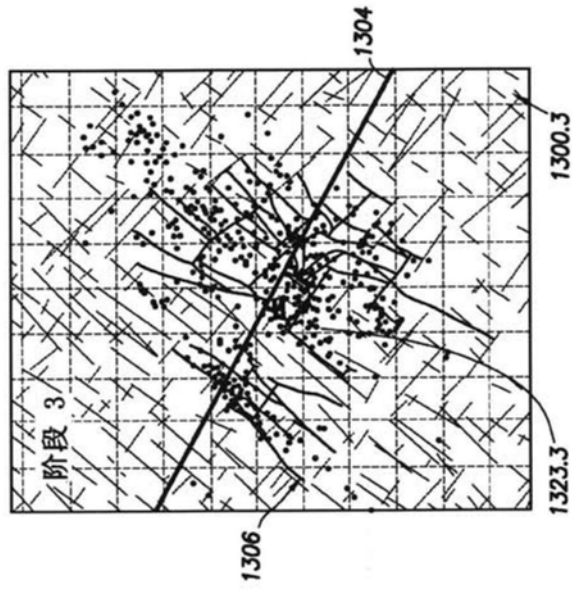


图13.3

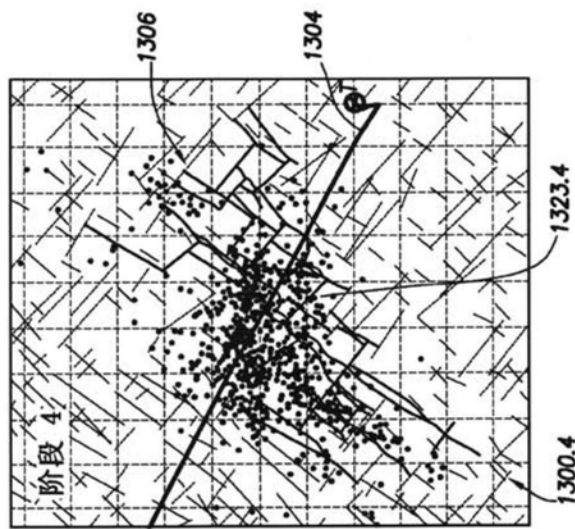


图13.4

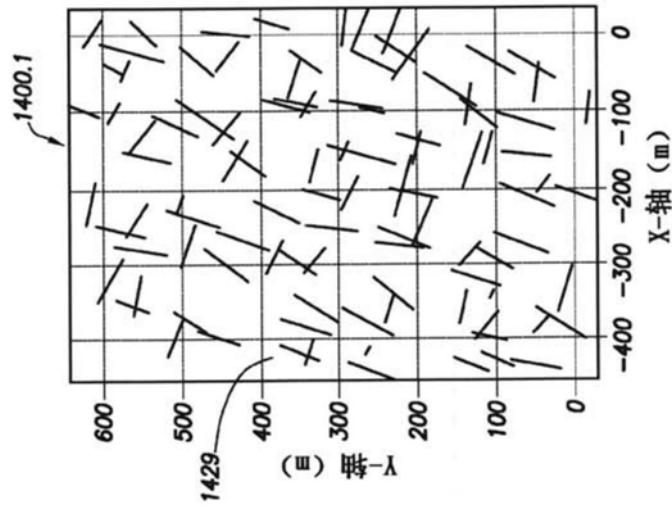


图14.1

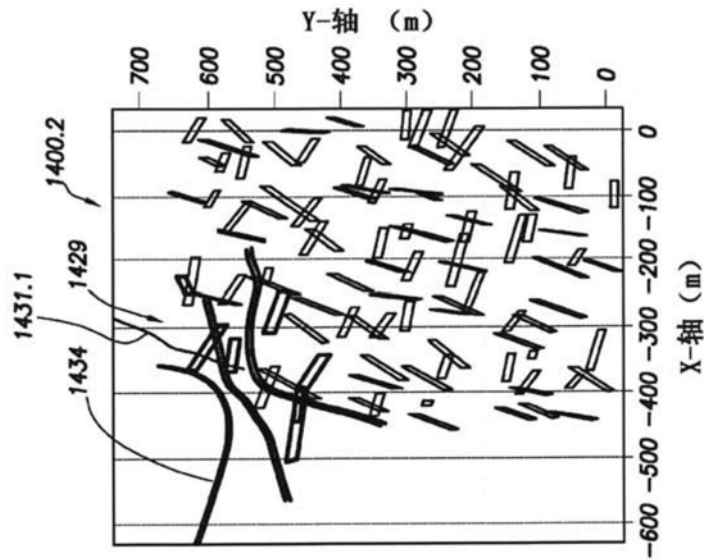


图14.2

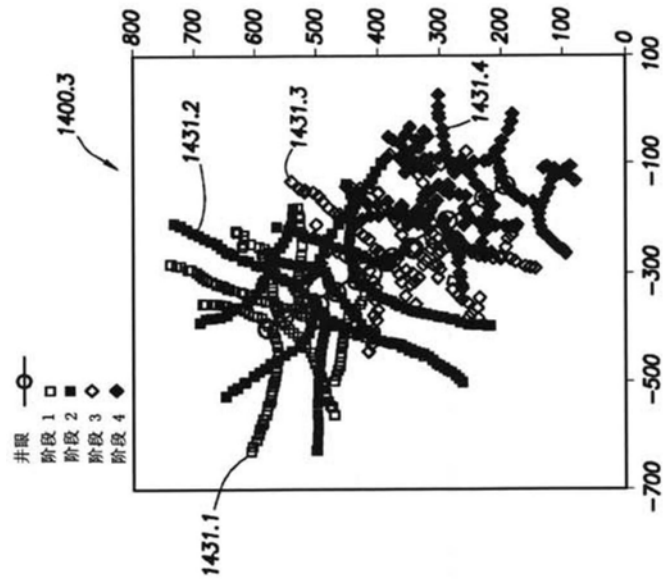


图14.3

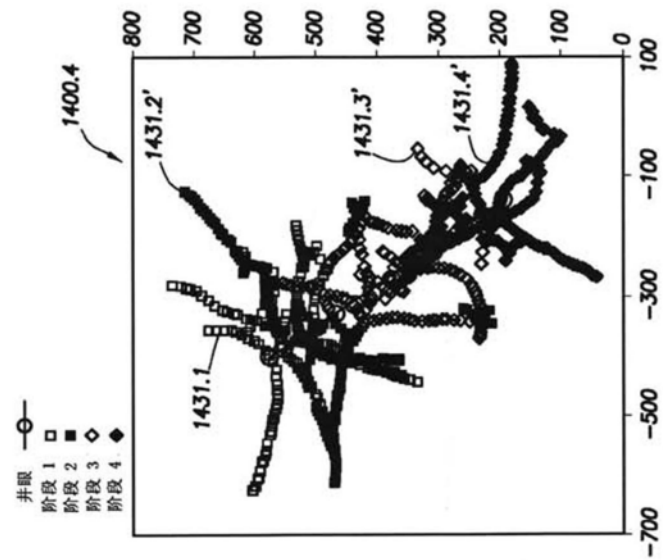


图14.4

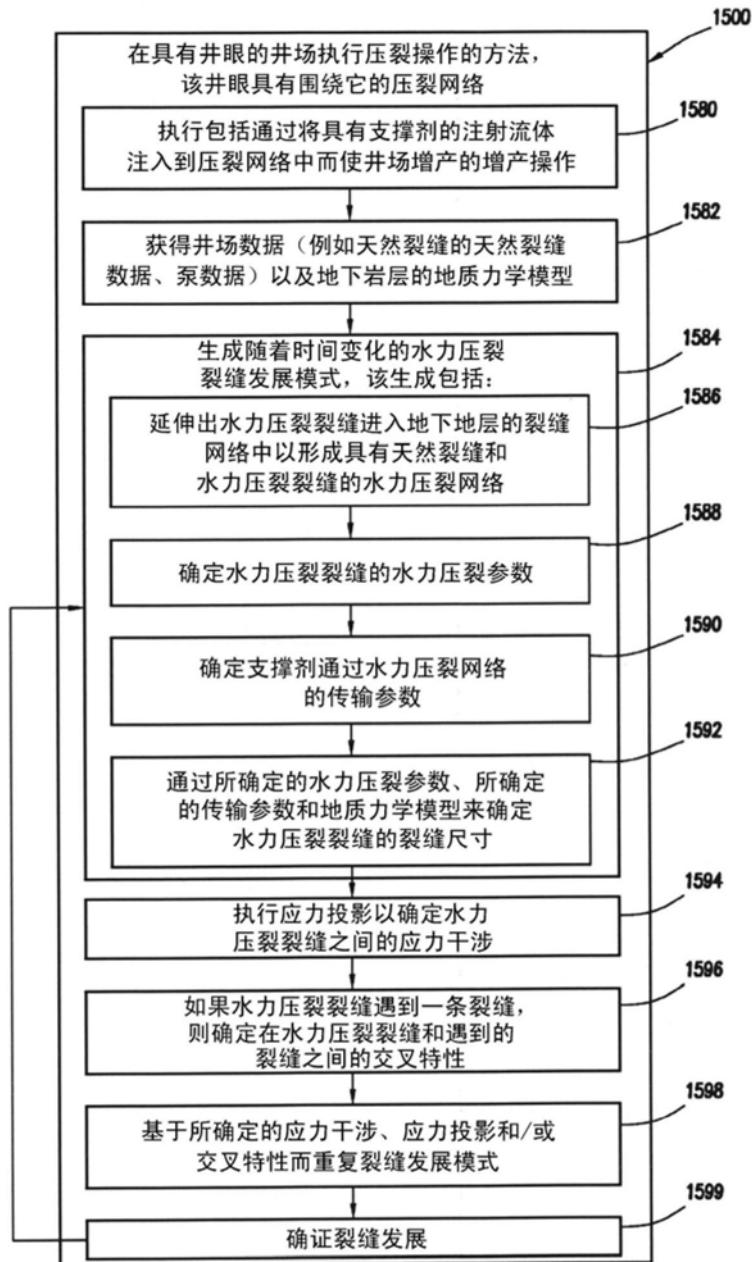


图15

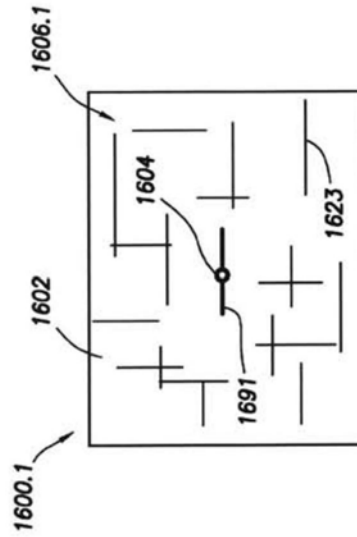


图16.1

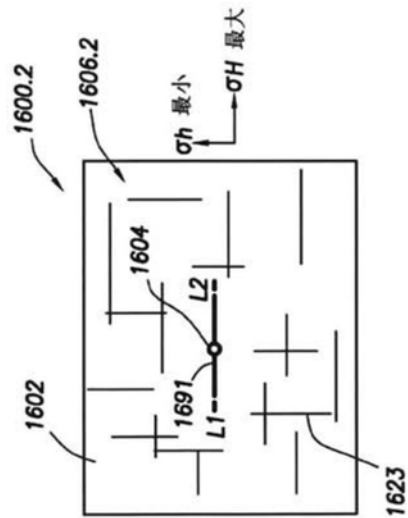


图16.2

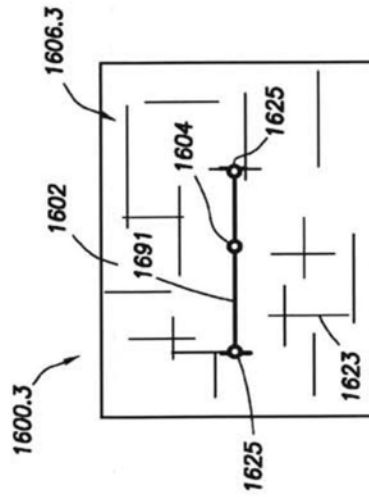


图16.3

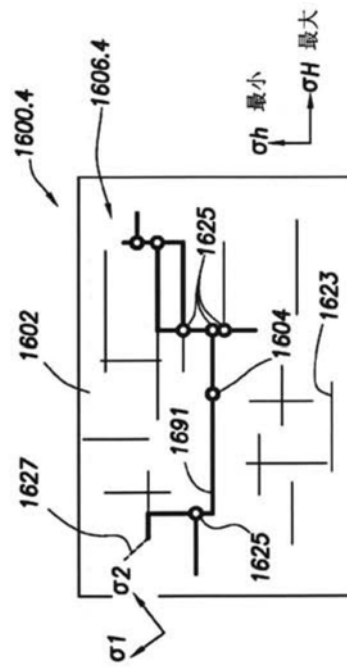


图16.4