



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 103827441 A

(43) 申请公布日 2014. 05. 28

(21) 申请号 201280047523. 0

(74) 专利代理机构 永新专利商标代理有限公司
72002

(22) 申请日 2012. 07. 30

代理人 周家新 蔡洪贵

(30) 优先权数据

61/574, 131 2011. 07. 28 US

(51) Int. Cl.

61/574, 521 2011. 08. 04 US

E21B 43/26 (2006. 01)

(85) PCT国际申请进入国家阶段日

2014. 03. 28

(86) PCT国际申请的申请数据

PCT/US2012/048871 2012. 07. 30

(87) PCT国际申请的公布数据

W02013/016733 EN 2013. 01. 31

(71) 申请人 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 C·E·科昂 W·徐 P·M·J·塔迪

X·翁

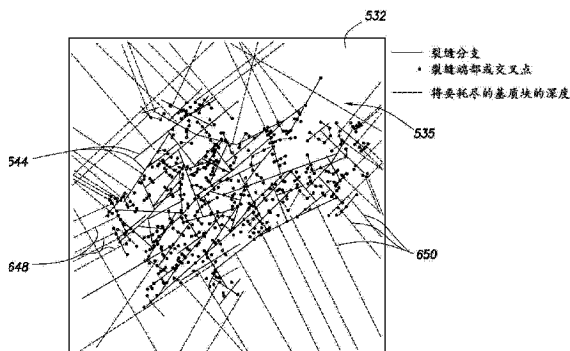
权利要求书3页 说明书22页 附图28页

(54) 发明名称

用于执行井眼压裂作业的系统和方法

(57) 摘要

提供了一种在穿透地下地层的井眼附近执行油田作业的方法。该方法包括通过在井眼附近产生裂缝来执行压裂作业。裂缝限定井眼附近的水力裂缝网络 (HFN)。该方法还包括通过从 HFN 外推裂缝数据, 在井眼附近产生离散裂缝网络 (DFN)。DFN 包括裂缝分支和基质块, 裂缝分支之间具有交叉点。该方法还包括产生通过 DFN 的泄油区的深度; 限定开采参数; 以及基于泄油区的深度和开采参数, 执行开采作业, 以从地下地层开采流体。开采作业可以包括产生通过 DFN 的流率; 基于流率产生 DFN 在初始时间的压力分布情况; 以及基于压力分布情况产生开采速度。



1. 一种在穿透地下地层的井眼附近执行开采作业的方法,该地下地层附近具有多个裂缝,该方法包括:

产生通过离散裂缝网络的流率,所述离散裂缝网络是从由地下地层中的多个裂缝限定的水力裂缝网络外推出来的,所述离散裂缝网络包括多个裂缝分支和多个基质块,所述多个裂缝分支之间具有交叉点;

基于所述流率产生离散裂缝网络在初始时间的压力分布情况;以及

基于所述压力分布情况产生开采速度。

2. 根据权利要求1的方法,其中产生流率包括产生从所述多个基质块中的一个到所述多个裂缝分支中的一个的流率。

3. 根据权利要求1的方法,其中产生流率包括产生所述多个裂缝中的至少一个内部的流率。

4. 根据权利要求1的方法,其中产生流率包括产生从所述多个基质块中的一个到一个裂缝分支的流率。

5. 根据权利要求1的方法,其中产生流率包括产生一个裂缝分支内部在所述离散裂缝网络的两个交叉点之间的流率。

6. 根据权利要求1的方法,其中产生流率包括产生所述多个裂缝中的一个的内部在所述离散裂缝网络的交叉点处的流率。

7. 根据权利要求1的方法,还包括确定所述多个裂缝分支中的两个之间的交叉点处的质量平衡。

8. 根据权利要求1的方法,其中产生压力分布情况包括使用达西定律产生所述压力分布情况。

9. 根据权利要求1的方法,其中产生压力分布情况不受时间步的约束。

10. 根据权利要求1的方法,还包括定义通过基质块的流体流动的时间函数,所述时间函数具有所述初始时间。

11. 根据权利要求10的方法,还包括更新所述通过基质块的流体流动的时间函数。

12. 根据权利要求1的方法,还包括在多个时间步更新所述开采速度。

13. 根据权利要求1的方法,还包括为所述多个裂缝分支更新所述开采速度。

14. 根据权利要求1的方法,还包括通过更新所述初始时间来补偿所述多个基质块中的每一个的开采的延迟,使得从所述多个基质块中的每一个开采的实际质量等于在所述多个裂缝分支中的邻近的一个的当前压力条件在从更新后的初始时间开始的时间里已变得恒定的条件下的质量。

15. 根据权利要求1的方法,还包括验证所述开采速度。

16. 根据权利要求15的方法,其中所述验证包括比较所述开采速度和通过储层模拟器产生的开采速度。

17. 根据权利要求15的方法,其中所述验证是针对具有高传导率、低传导率、双翼裂缝、线网裂缝、时间延迟及它们的组合的离散裂缝网络执行的。

18. 根据权利要求15的方法,其中所述验证包括修改所述初始时间,使得对于所述多个裂缝分支中的每一个,随着时间流逝而从所述多个基质块开采的体积满足质量平衡。

19. 一种在穿透地下地层的井眼附近执行油田作业的方法,该地下地层中具有储层,该

方法包括：

执行压裂作业，所述压裂作业包括在井眼附近产生裂缝，所述裂缝限定所述井眼附近的水力裂缝网络；

通过从所述水力裂缝网络外推裂缝数据，在所述井眼附近产生离散裂缝网络，所述离散裂缝网络包括多个裂缝分支和多个基质块，所述多个裂缝分支之间具有交叉点；

产生通过所述离散裂缝网络的泄油区的深度；

限定至少一个开采参数；以及

基于所述泄油区的深度和所述至少一个开采参数，执行开采作业，以从所述地下地层开采流体。

20. 根据权利要求 19 的方法，还包括测量所述井眼附近的井下数据。

21. 根据权利要求 19 的方法，其中所述执行压裂作业包括通过向所述地下地层注入流体来对从所述井眼的开采进行增产。

22. 根据权利要求 19 的方法，其中所述执行压裂作业包括对执行所述压裂作业进行模拟。

23. 根据权利要求 19 的方法，其中所述离散裂缝网络考虑所述多个裂缝分支中的每一个处的至少一个裂缝属性的平均值。

24. 根据权利要求 23 的方法，其中所述至少一个裂缝属性包括裂缝分支末端处的空间坐标；裂缝分支位置处的传导率、平均传导率、高度、平均高度、储层压力、平均储层压力；所述裂缝分支位置处的渗透率、平均储层渗透率；及它们的组合。

25. 根据权利要求 19 的方法，其中产生泄油区的深度包括评价通过所述离散裂缝网络的所述多个基质块的泄油区的深度。

26. 根据权利要求 19 的方法，其中产生泄油区的深度包括基于通过所述多个基质块的线性流动近似来产生用于所述多个基质块中每一个的泄油区的深度。

27. 根据权利要求 19 的方法，其中产生泄油区的深度包括自动地评价在所述多个裂缝分支中的每一个的前端即将被耗尽的所述多个基质块的泄油区的深度，并且对于所述多个基质块中的每一个补偿要耗尽的体积。

28. 根据权利要求 19 的方法，其中所述至少一个开采参数包括井底压力、储层条件下的储层流体粘度、储层条件下的储层流体压缩率、要模拟的开采的持续时间以及它们的组合。

29. 根据权利要求 19 的方法，其中所述执行开采作业包括在井眼中放置管子，并且将流体从储层传输到地表位置。

30. 根据权利要求 19 的方法，其中所述执行开采作业包括通过模拟从所述井眼的流体开采，估计从所述井眼的开采速度。

31. 根据权利要求 30 的方法，其中所述执行开采作业包括显现开采速度。

32. 根据权利要求 30 的方法，还包括基于所估计的开采速度调整所述开采作业的执行。

33. 根据权利要求 19 的方法，其中基于裂缝参数的范围执行开采作业。

34. 一种在穿透地下地层的井眼附近执行油田作业的方法，该地下地层中具有储层，该方法包括：

通过将流体注入所述地下地层以使得在所述井眼附近产生裂缝,来对所述井眼进行增产;

测量所述裂缝,并基于所测量的裂缝来限定水力裂缝网络;

通过从所述水力裂缝网络外推裂缝数据,在所述井眼附近产生离散裂缝网络,所述离散裂缝网络包括多个裂缝分支和多个基质块,所述多个裂缝分支之间具有交叉点;

产生通过所述离散裂缝网络的泄油区的深度;

限定至少一个开采参数;

基于所述泄油区的深度和所述至少一个开采参数,估计随时间的开采速度;以及

基于所估计的开采速度从所述地下地层开采流体。

用于执行井眼压裂作业的系统和方法

[0001] 对先前申请的交叉引用

[0002] 本申请要求 2011 年 8 月 4 日提交的美国临时申请 No. 61/574, 521 和 2011 年 7 月 28 日提交的美国临时申请 No. 61/574, 131 的优先权, 通过引用将其全部内容合并于此。

技术领域

[0003] 本公开总体上涉及用于执行井场作业的方法和系统。更具体地说, 本公开致力于用于执行压裂作业的方法和系统, 例如, 调查地下地层以及表征地下地层中的水力裂缝网络。

背景技术

[0004] 为了便于从油气井中回收油气, 可以通过水力压裂这些井周围的地下地层。可以使用水力压裂来在地表下地层中创建裂纹, 以使得油或气能够向井移动。通过一个或多个井眼, 以高压、高流率将特别设计的流体 (这里称为“压裂流体”或“压裂浆”) 引入地层来压裂地层。根据地层中的自然应力, 水力裂缝可以从井眼沿着两个相反的方向延伸几百英尺。在某些情况下, 它们可以形成复杂的裂缝网络。

[0005] 压裂流体可以承载有支撑剂, 支撑剂是一定尺寸的颗粒, 其可以与压裂流体混合以帮助提供用于油气从地层 / 储层到井眼的开采的有效导路。支撑剂可以包括天然的砂粒或碎石; 人造或特别设计的支撑剂, 例如纤维、涂覆了树脂的砂石、或高强度陶瓷材料如烧结铝矾土。支撑剂异质或同质地聚集到裂缝中, 以在地层中“撑”开新的裂纹或孔。支撑剂创建可渗透导路的面, 通过该导路, 开采流体可以流入井眼。优选地, 压裂流体具有高粘度, 并因此能够携带有效数量的支撑剂材料。

[0006] 压裂流体可以由粘性流体实现, 该粘性流体有时被称为“填充物”, 被以足以在含油气地层中引起和传播裂缝的流率和压力注入到处理井中。“填充物”的注入一直继续到获得具有充足的几何结构的裂缝以使得能够放置支撑剂颗粒。在注入“填充物”之后, 压裂流体可以包括压裂流体和支撑剂材料。压裂流体可以是凝胶、油基、水基、盐水、酸、乳剂、泡沫或任何其它类似的流体。压裂流体可以包含若干添加剂, 增粘剂、减阻剂、失水添加剂、阻蚀剂等。为了保持支撑剂悬浮在压裂流体中, 直到地层的所有间隔都被如期压裂的时间, 支撑剂的密度可以接近所用压裂流体的密度。

[0007] 支撑剂可以包括任何商业可得熔融材料, 例如硅土或氧化物。熔融材料可以包括任何商业可得玻璃或高强度陶瓷产品。在放置支撑剂之后, 可以将井关闭足以将压力释放到地层中的时间。这使得裂缝闭合, 并且对支撑剂颗粒施加闭合应力。关闭时间长度可以从几分钟到几天变化。

[0008] 当前的水力裂缝监控方法和系统可以映射裂缝在哪里产生以及裂缝的程度。一些微震监控方法和系统可以通过使用建模的行程时间和 / 或传播路径, 将地震到达时间和极化信息映射到三维空间中, 来处理地震事件位置。这些方法和系统可以用来推断水力裂缝随时间的传播。

[0009] 传统水力裂缝模型还可以假定双翼型诱发裂缝。这些双翼裂缝可能不足以表达一些具有先前存在的自然裂缝的非常规储层中诱发的裂缝的复杂属性。已发布的模型可以基于对微震事件分布的监控来映射离散水力裂缝的复杂几何结构。

[0010] 在一些情况下,模型可以不必因考虑泵送流体的量或者裂缝和注入流体之间以及裂缝之间的机械相互作用而受约束。一些约束模型可以提供对所涉及的机制的基本理解,但为了提供对水力裂缝传播的准确模拟,在数学描述和 / 或所需计算处理资源和时间方面可能复杂。

[0011] 非常规地层,例如页岩,正在发展成为油气开采的源。曾经仅将岩石和密封视为源,现在页岩地层被视为具有紧致孔隙度和低渗透率的非常规储层。通过压裂增产创建的水力裂缝的模式可能是复杂的,并且形成裂缝网络,如关联微震事件分布所指示。已开发复杂水力裂缝网络 (HFN) 以表示所创建的水力裂缝。裂缝模型的例子在美国专利 / 申请 No. 6101447、7363162、7788074、20080133186、20100138196 以及 20100250215 中提供。

[0012] 可以使用页岩地层的水力压裂来从储层进行增产和开采。已经开发了开采模拟,以估计从储层的开采。对于常规储层,已使用各种开采模拟技术。在下述文章中提供了开采模拟的例子:Warren 等人., "The Behavior of Naturally Fractured Reservoirs, Soc. Pet. Eng. J., Vol. 3(3):pp. 245-255(1963) (下文中称为 "Warren&Root"); Basquet 等人., "Gas Flow Simulation in Discrete Fracture Network Models". 2003 年 2 月 3-5 日在得克萨斯州的休斯顿召开的 SPE Reservoir Simulation Symposium (SPE 储层模拟专题讨论会) 上提交的论文 SPE79708 (下文中称为 "Basquet"); Gong 等人., "Detailed Modeling of the Complex Fracture Network of Shale Gas Reservoirs", 2011 年 1 月 31 日在阿曼的马斯喀特召开的 SPE Middle East Unconventional Gas Conference and Exhibition (SPE 中东非常规天然气会展) 上提交的 SPE 论文 142705 (下文中称为 "Gong"); Cinco-Ley 等人., "Pressure Transient Analysis for Naturally Fractured Reservoirs", 1982 年 9 月 26 日在路易斯安那州新奥尔良召开的 Annual Fall Technical Conference and Exhibition (年度秋季技术会展) 上提交的 SPE 论文 11026 (下文中称为 "Cinco-Ley"); Xu 等人., "Quick Estimate of Initial Production from Stimulated Reservoirs with Complex Hydraulic Fracture Network", 2011 年 10 月 30 日在美国科罗拉多州丹佛召开的 SPE Annual Technical Conference and Exhibition (SPE 年度技术会展) 上提交的论文 SPE146753 (下文中称为 "Xu2011"); 以及 C. E. Cohen 等人., "Production Forecast After Hydraulic Fracturing in Naturally Fractured Reservoir: Coupling a Complex Fracturing Simulator and a Semi-Analytical Production Model", 2012 年 2 月 8 日在美国得克萨斯州伍德兰兹召开的 SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference and Exhibition (SPE 水力压裂技术会展) 上提交的论文 (SPE152541), 通过引用将其全部内容合并于此。然而,储层有可能是非常规的和 / 或具有自然裂缝,例如具有页岩的储层。

发明内容

[0013] 在至少一个方面,本公开涉及一种在穿透地下地层的井眼附近执行开采作业的方法。该地下地层附近具有多个裂缝。该方法包括产生通过离散裂缝网络的流率,该离散裂

缝网络是由地下地层中的多个裂缝限定的。该离散裂缝网络包括多个裂缝分支和多个基质块,多个裂缝分支之间具有交叉点。该方法还包括基于流率产生离散裂缝网络在初始时间的压力分布情况,以及基于压力分布情况产生开采速度。

[0014] 在另一个方面,本公开涉及一种在穿透地下地层的井眼附近执行油田作业的方法。该地下地层中具有储层。该方法包括执行压裂作业,压裂作业包括在井眼附近产生裂缝。裂缝限定井眼附近的水力裂缝网络。该方法还包括通过从水力裂缝网络外推裂缝数据,在井眼附近产生离散裂缝网络。离散裂缝网络包括多个裂缝分支和多个基质块,多个裂缝分支之间具有交叉点。该方法还包括产生通过离散裂缝网络的泄油区的深度,限定至少一个开采参数,以及基于泄油区的深度和至少一个开采参数,执行开采作业,以从地下地层开采流体。

[0015] 最后,在另一方面,本公开涉及一种在穿透地下地层的井眼附近执行油田作业的方法。该方法包括:通过将流体注入地下地层以使得在井眼附近产生裂缝,来对井眼进行增产;测量裂缝,并基于所测量的裂缝来限定水力裂缝网络。

[0016] 该方法还包括通过从水力裂缝网络外推裂缝数据,在井眼附近产生离散裂缝网络。该离散裂缝网络包括多个裂缝分支和多个基质块,多个裂缝分支之间具有交叉点。该方法还包括产生通过离散裂缝网络的泄油区的深度;限定至少一个开采参数;基于泄油区的深度和开采参数,估计随时间的开采速度;以及基于所估计的开采速度从地下地层开采流体。

[0017] 提供此发明内容部分是为了介绍下面在详细描述中将进一步描述的构思的选集。此发明内容部分并不意图确定所要求保护的的主题的关键或必要特征,也不意图用来帮助限定所要求保护的的主题的范围。

附图说明

[0018] 参考附图来描述用于表征井眼应力的系统和方法的实施例。在所有附图中,使用相同的附图标记来表示相同的特征和组件。

[0019] 图 1.1-1.4 是图解井场处的各种油田作业的示意图;

[0020] 图 2.1-2.4 是通过图 1.1-1.4 的作业收集的数据的示意图;

[0021] 图 3 是描绘压裂作业的水力压裂现场的示意图;

[0022] 图 4.1 和 4.2 分别是描绘执行油田作业和开采作业的方法的流程图;

[0023] 图 5 是从水力裂缝模拟提取的离散裂缝网络 (DFN) 的开采模拟的示意性图解;

[0024] 图 6 是具有多个基质块的图 5 的 DFN 的示意性图解;

[0025] 图 7 是通过基质块的流动的近似的示意性图解;

[0026] 图 8.1-8.3 分别是图解井的开采、累积开采量和压力的示意性图解;

[0027] 图 9 是描绘基质块的裂缝的坐标的示意图;

[0028] 图 10 是描绘从基质块到 DFN 的分支的流率的示意图;

[0029] 图 11.1 和 11.2 是描绘高传导率 DFN 的压力与时间的关系随时间的变化的曲线图;

[0030] 图 12 是高传导率 DFN 的归一化压力和时间延迟随时间的变化的曲线图;

[0031] 图 13 是高传导率 DFN 的累积开采量随时间的变化的曲线图;

- [0032] 图 14.1 和 14.2 是低传导率 DFN 的压力与时间的关系随时间的变化的曲线图；
- [0033] 图 15 是低传导率 DFN 的归一化压力和时间延迟随时间的变化的曲线图；
- [0034] 图 16 是低传导率 DFN 的累积开采量随时间的变化的曲线图；
- [0035] 图 17 是使用非常规开采模型 (UPM) 的低传导率 DFN 的归一化压力和时间延迟随时间变化的曲线图；
- [0036] 图 18 是使用 UPM 的低传导率 DFN 的累积开采量随时间的变化的曲线图；
- [0037] 图 19 是压力和时间延迟随时间变化的曲线图的表；
- [0038] 图 20 是比较使用储层模拟器和 UPM 模拟的开采随时间变化的曲线图；
- [0039] 图 21.1 和 21.2 分别是描绘由储层模拟器和 UPM 描绘的 DFN 的示意图；
- [0040] 图 22 是对于不同的裂缝传导率比较使用储层模拟器和 UPM 模拟的开采随时间的变化的曲线图；
- [0041] 图 23.1 和 23.2 分别是由储层模拟器、UPM 和没有延迟的 UPM 得到的流率和累积开采量随时间的变化的曲线图。

具体实施方式

[0042] 下面的描述包括实施这里的主题的技术的示例性系统、装置、方法和指令序列。然而，应当理解，所描述的实施例可以在没有这些具体细节的情况下实施。

[0043] 本公开涉及用于执行压裂作业以估计和 / 或预测产量的技术。压裂作业涉及裂缝建模，裂缝建模利用椭圆和线网模型来估计产量。

[0044] 图 1.1-1.4 图示了可以在井场执行的各种油田作业，图 2.1-2.4 图示了可以在井场收集的各种信息。图 1.1-1.4 图示了代表性油田或井场 100 的简化示意图，该代表性油田或井场 100 具有地下地层 102，地下地层 102 中包含例如储层 104，并且还图示了在井场 100 执行的各种油田作业。图 1.1 图示了由勘探工具如地震车 106.1 执行以测量地下地层的属性的勘探作业。勘探作业可以是用于产生声振动的地震勘探作业。在图 1.1 中，由源 110 产生的一种这样的声振动 112 在地层 116 中的多个水平层 114 处反射。可以由位于地球表面的传感器如地震检波器—接收器 118 接收声振动 112，并且地震检波器 118 产生电输出信号，在图 1.1 中称为“所接收的数据” 120。

[0045] 响应于代表声振动 112 的不同参数（例如幅度和 / 或频率）的所接收的声振动 112，地震检波器 118 可以产生包含有关地下地层的数据的电输出信号。可以提供所接收的数据 120 作为对地震车 106.1 的计算机 122.1 的输入数据，并且响应于输入数据，计算机 122.1 可以产生地震和微震数据输出 124。可以对地震数据输出 124 进行存储、发送、或根据期望进行进一步处理如数据约减。

[0046] 图 1.2 图示了由钻井工具 106.2 执行的钻井作业，其中钻井工具 106.2 由钻机 128 悬挂，并且被推进到地下地层 102 中，以形成井眼 136 或其它通道。可以使用泥浆坑 130 将钻井泥浆经由管线 132 抽吸到钻井工具中，以使钻井泥浆循环通过钻井工具上到井眼 136 并返回地表。钻井泥浆可以被过滤，然后返回泥浆坑。可以使用循环系统来存储、控制或过滤流动的钻井泥浆。在这个图示中，钻井工具被推进到地下地层以到达储层 104。每个井可以以的一个或多个储层为目标。钻井工具可以被适配以使用随钻测井工具测量井下属性。随钻测井工具还可以被适配以如图所示收取岩心样本 133，或者被移除以便可以使用其它工

具来收取岩心样本。

[0047] 可以使用地面单元 134 来与钻井工具和 / 或场外作业进行通信。地面单元可以与钻井工具通信,以向钻井工具发送命令,并从钻井工具接收数据。地面单元可以具有计算机设备,以接收、存储、处理和 / 或分析来自作业的数据。地面单元可以收集钻井作业期间产生的数据,并产生可以被存储或发送的数据输出 135。计算机设备,例如地面单元中的计算机设备,可以位于井场附近各种位置处和 / 或位于远距离处。

[0048] 可以在油田附近放置诸如计量器的传感器 (S),以收集与先前描述的各种作业有关的数据。如图所示,传感器 (S) 可以放置在钻井工具中一个或多个位置处和 / 或位于钻机处,以测量钻井参数,如钻压、钻头扭矩、压力、温度、流率、成分、旋转速度和 / 或其它作业参数。传感器 (S) 还可以位于循环系统中的一个或多个位置中。

[0049] 可以由地面单元和 / 或其它数据收集源来收集由传感器收集的数据,以进行分析或其它处理。可以单独使用或与其它数据结合使用由传感器收集的数据。可以将数据收集在一个或多个数据库和 / 或就地或场外发送。可以选择性地使用全部或选择的部分数据来对当前和 / 或其它井眼进行分析和 / 或预测作业。数据可以是历史数据、实时数据或它们的组合。可以实时使用实时数据,或将其存储以备以后使用。还可以将数据与历史数据或其它输入组合以进行进一步的分析。可以将数据存储在分离的数据库中,或者组合到单个数据库中。

[0050] 可以使用所收集的数据来执行分析,如建模作业。例如,可以使用地震数据输出来执行地质、地球物理、和 / 或储层工程分析。可以使用储层、井眼、地面和 / 或处理后的数据来执行储层、井眼、地质、以及地球物理或其它模拟。来自作业的数据输出可以从传感器直接产生,或在一些预处理或建模之后产生。这些数据输出可以用作其它分析的输入。

[0051] 数据可以被收集并存储在表面单元 134 处。一个或多个地面单元可以位于井场或者在远处连接到井场。地面单元可以是单个单元或多个单元的复杂网络,用于执行整个油田必要的管理功能。地面单元可以是手动或自动系统。地面单元 134 可以由用户操作和 / 或调整。

[0052] 地面单元可以具有收发器 137,以使得地面单元和当前油井的各个部分或其它位置处之间能够进行通信。地面单元 134 还可以具有或者功能性地连接到一个或多个控制器,以驱动井场 100 处的机械装置。然后地面单元 134 可以响应于所接收的数据向油田发送命令信号。地面单元 134 可以经由收发器接收命令,或者可以自己执行给控制器的命令。可以提供处理器以(本地或远程)分析数据,做出决定和 / 或驱动控制器。以这种方式,可以基于所收集的数据选择性地调整操作。可以基于该信息来优化部分操作,例如控制钻井、钻压、泵送速率或其它参数。这些调整可以基于计算机协议自动进行,和 / 或由操作员手动进行。在一些情况下,可以调整井规划以选择最佳操作条件,或者避免问题。

[0053] 图 1.3 图示了由钻机 128 悬挂并进入图 1.2 的井眼 136 的电缆测井工具 106.3 执行的电缆测井作业。电缆测井工具 106.3 可以被适配以部署到井眼 136 中,用来产生测井曲线,执行井下测试和 / 或收集样本。电缆测井工具 106.3 可以用来提供另一种执行地震勘探作业的方法和设备。图 1.3 的电缆测井工具 106.3 可以例如具有爆炸性、放射性、电学或声学能量源 144,该能量源 144 向周围的地下地层 102 及其中的流体发送电信号和 / 或从周围的地下地层 102 及其中的流体接收电信号。

[0054] 电缆测井工具 106.3 可以可操作地连接到例如图 1.1 的地震车 106.1 的地震检波器 118 和计算机 122.1。电缆测井工具 106.3 还可以向地面单元 134 提供数据。地面单元 134 可以收集在电缆测井作业期间产生的数据,并产生可以被存储或发送的数据输出 135。电缆测井工具 106.3 可以位于井眼中各种深度,以提供勘察结果或与地下地层有关的其它信息。

[0055] 可以在井场 100 附近放置诸如计量器的传感器 (S),以收集与先前描述的各种作业有关的数据。如图所示,传感器 (S) 放置在电缆测井工具 106.3 中,以测量涉及例如孔隙率、渗透率、流体成分和 / 或作业的其它参数。

[0056] 图 1.4 图示了由从开采单元或“圣诞树”129 部署并进入图 3 中完成的井眼 136 的开采工具 106.4 执行的开采作业,用于将流体从井下储层抽吸到地表设施 142。流体从储层 104 通过套管 (未示出) 中的射孔井进入井眼 136 中的开采工具 106.4,并经由集输管网 146 到地面设施 142。

[0057] 可以在油田附近放置诸如计量器的传感器 (S),以收集与先前描述的各种作业有关数据。如图所示,传感器 (S) 可以放置在开采工具 106.4 或相关设备如“圣诞树”129、集输管网、地面设施和 / 或开采设施中,以测量流体参数如流体成分、流率、压力、温度和 / 或开采作业的其它参数。

[0058] 尽管仅示出了简化的井场配置,但应当理解油田或井场 100 可以覆盖具有一个或多个井场的陆地、海洋和 / 或水域的一部分。为了提高采收率或存储例如碳氢化合物、二氧化碳或水,开采也可以包括注入井 (未示出)。一个或多个集输设施可以可操作地连接到一个或多个井场,以从井场选择性地收集井下流体。

[0059] 应当理解,图 1.2-1.4 图示的工具不但可以测量油田属性而且可以测量非油田作业的属性,例如矿藏、含水层、储藏以及其它地下设施。而且,尽管图示了特定的数据获取工具,但是应当理解,可以使用能够感测诸如地下地层的地震双向行程时间、密度、电阻率、开采速度等和 / 或其地质信息的参数的各种测量工具 (例如电缆测井、随钻测量 (MWD)、随钻测井 (LWD)、岩心采样等)。可以沿着井眼和 / 或监测工具在各种位置处放置各种传感器 (S),以收集和 / 或监测所期望的数据。还可以从场外位置处提供其它数据源。

[0060] 图 1.1-1.4 的油田配置图示了井场 100 和通过这里提供的技术可以使用的各种作业的示例。油田的部分或全部可以在陆地上、水上和 / 或海上。而且尽管图示了在单个位置处测量单个油田的情况,但是可以以一个或多个油田、一个或多个处理设施、以及一个或多个井场的任何组合来利用储层工程。

[0061] 图 2.1-2.4 分别是由图 1.1-1.4 的工具收集的数据的示例的图形表示。图 2.1 表示由地震车 106.1 收取的图 1.1 的地下地层的地震道 202。地震道可以用于提供诸如在一段时间中的双向响应的数据。图 2.2 图示了由钻井工具 106.2 收取的岩心样本 133。岩心样本可以用于提供诸如沿着岩心的长度方向上岩心样本的密度、孔隙率、渗透率或其它物理属性。可以在变化的压力和温度下对岩心中的流体执行密度和粘度的测试。图 2.3 图示了由电缆测井工具 106.3 收取的图 1.3 的地下地层的测井曲线 204。电缆测井可以提供各种深度处地层的电阻率或其它测量结果。图 2.4 图示了在地面设施 142 处测量的流过图 1.4 的地下地层的流体的产量递减曲线或图表 206。产量递减曲线可以提供作为时间 t 的函数的开采速度 Q 。

[0062] 图 2.1、2.3 和 2.4 的各个图表图示了可以描述或提供有关地层或其中所包含的储层的物理特性的信息的静态测量结果。这些测量结果可以被分析以限定地层的属性,从而确定测量的精确度和 / 或检查错误。可以将各个测量中每个的图对齐或缩放,以进行属性的比较与核实。

[0063] 图 2.4 图示了通过井眼对流体属性的动态测量结果。随着流体流过井眼,对流体属性如流率、压力、成分等进行测量。如下面所描述的,可以对静态和动态测量结果进行分析,并用于产生地下地层的模型,以确定其特性。也可以使用类似的测量结果来测量地层方面随时间的变化。

[0064] 油田作业

[0065] 可以在从井眼产生开采之前、期间或之后模拟开采作业。可以使用各种技术来执行对从复杂的破裂储层的开采的模拟。可以使用双重孔隙度模型来解决裂缝和储层(基质)的其余部分之间的属性差异。双重孔隙度可以考虑彼此连接的两个粗网格,一个用于裂缝网络,另一个用于基质。该方法还可以包括对(例如裂缝网络的)属性取平均和简化,以对两种介质之间的交换项进行建模。该方法可以用于例如天然破裂的储层。对于裂缝网络的近井眼效应,例如在通过水力压裂创建的的网络的情况下,可以提供附加的分析。在先前通过引用合并于此的 Warren 和 Root 的论文中描述了双重孔隙度技术。

[0066] 另一种方案包括使用既包括裂缝又包括储层的一种介质以及细化的数值网络。可能需要额外的计算时间来进行处理。可以使用例如专门的储层模拟器来提供网格化的灵活性(例如非结构化的网眼产生)。

[0067] 又一种方案包括使用关于离散裂缝网络(DFN)的双重孔隙度方程。先前通过引用合并于此的 Basquet 论文中提供了 DFN 的例子。可以使用其它的方法来模拟从基质到裂缝的流动。在一些情况下,例如具有压缩储层流体(例如气体)的情况下,可以考虑从每个基质块到 DFN 的开采历史。可以使用方程组中附加的未知数来将基质块网格化。先前通过引用合并于此的 Gong 论文提供了网格化的例子。还可以提供分析解来模拟流动。可以从连续性方程的拉普拉斯变换推导出解。先前通过引用合并于此的 Cinco-Ley 和 Xu2011 论文提供了分析解的例子。

[0068] 可以考虑瞬变裂缝压力来获得可以使用时间的数值积分的复杂表达。也可以考虑恒定裂缝压力,也可以获得相对于压力为线性的基质和裂缝之间的流率的表达式。可以在例如 DFN 内的压力的变化可以忽略(例如处于恒定井眼压力)的传导性裂缝中使用这种解。本公开可以采用一种或多种方案来产生分析解。在水力压裂和 / 或天然破裂储层的情况下,这种解可以延及一定范围的裂缝传导性。

[0069] 本公开提供针对在天然破裂储层中进行水力压裂的情况下一定范围的裂缝传导性的分析解。这种模拟可以适用于非常规储层,例如页岩气,尽管其也可以适用于其它地下地层。这些非常规储层具有两个主要特征:低岩石渗透率和稠密的天然裂缝网络。可以提供增产方案来解决非常规或可以包括水平井和大规模水力压裂处理以进行开采的其它储层的开采模式的潜在区别。在一些情况下,这些处理引出与天然裂缝相互作用的水力裂缝,并且可以导致将井连接到储层的复杂裂缝网络。

[0070] 本公开文件公开了一种模拟从储层(例如在创建了复杂的水力裂缝网络之后的非常规(天然破裂)储层)进行的开采的方法。所公开的方法首先将来自非常规裂缝模型

(UFM) 的结果外推,然后在一定时间期限内以一定精确度范围,用将向用户给出对井在几年内的开采的预测的方法对其进行处理。本申请的方法将针对全范围的裂缝传导率的半分析模型的有效性延伸以在实际情况下进行考虑。可以相对于通过储层模拟(例如从斯伦贝谢技术公司商业可得的 ECLIPSETM(www.slb.com)) 进行的模拟来验证该模拟器,以阐明该算法对于给定范围的裂缝传导率提供精确结果的能力。

[0071] 本公开文件还公开了模拟从已通过水力压裂来增产的天然破裂储层进行的开采的方法。该方法的部分可以以模拟水力裂缝处理的软件程序实现。本方法可以首先将来自模拟的结果外推,以重新创建经适配的水力裂缝网络,该经适配的水力裂缝网络在网络的交叉点之间具有平均属性,然后估计每个裂缝面前端的等效块深度。最后,可以输入用于开采条件的参数,并且运行开采模拟器。从与裂缝接触的每个基质块的开采使用分析表达,该分析表达可以延及成问题的参数(传导率、渗透率等)的全范围的实际值。这是通过对于每个裂缝面在每个时间步更新初始开采时间,以补偿每个基质块的开采中的延迟,并在某种程度上保持储层流体在放置/开采中的质量平衡,来实现的。这一更新是通过计算这个初始时间的搜索算法来执行的,使得从基质块的每一侧实际开采的质量等于在邻近裂缝中的当前压力条件已在时间方面变得恒定并且已在更新后的初始时间启动的情况下从基质块的每一次开采的质量。本方法可以与通过现有储层模拟器如 ECLIPSETM 进行的模拟作比较。可以执行针对一定范围的裂缝传导率的结果,并且与储层模拟器进行交叉检验。

[0072] 图 3 是图解根据本公开的用于水力压裂地下地层(这里称为“裂缝现场”)的示例性操作设置。裂缝现场 300 可以位于陆地上或在水环境中,并且包括延伸进入地下地层的处理井 301 以及延伸进入地下地层并与处理井 301 偏移的监控井 303。监控井 303 包括以规定距离间隔开的地震检波器接收器 305(例如三元件地震检波器)的阵列,如图所示。

[0073] 在压裂作业期间,压裂流体被从地表 311 泵送到处理井 301 中,使得油气储层 307 中的周围地层被压裂,并形成水力裂缝网络 308。这样的压裂产生微震事件 310,微震事件 310 发射压缩波(也被称为“初波”或“P 波”)和剪切波(也称为“次波”或“S 波”),压缩波和剪切波通过大地传播,并被监控井 303 的地震检波器接收器阵列 305 记录。

[0074] 可以通过测量 P 波和 S 波的到达时间之差来计算到微震事件 310 的距离。而且,可以使用检查 P 波的粒子运动的矢端图分析来确定指向事件的方位角。通过使用阵列 305 的接收器之间的 P 波和 S 波到达延迟来约束事件 310 的深度。这些微震事件 310 的距离、方位角和深度值可以用于导出由压裂流体随时间而导致的破裂的几何边界或轮廓,例如由高度 h 、椭圆纵横比 e 和长轴 a 限定的椭圆边界,如图 3 所示。

[0075] 现场 301 还包括用于将高压压裂流体供应到处理井 301 的压裂流体供应和泵送装置(未示出)。压裂流体可以在其中预先混合了支撑剂(以及可能的其它特殊组分)的情况下存储。可替换地,压裂流体可以在没有预先混合支撑剂或其它特殊组分的情况下存储,而支撑剂(和/或其它特殊组分)通过如美国专利 No. 7, 516, 793(通过引用将其全文合并于此)中所描述的过程控制系统,以受控的方式,混合到压裂流体中。处理井 301 还包括:示意性地示出的流率传感器 S,用于测量供应给处理井的压裂流体的泵送速度;和井底压力传感器,用于测量处理井 301 中压裂流体的井底压力。

[0076] 数据处理系统 309 链接到监控井 303 中的阵列 305 的接收器和处理井 301 的传感器 S(例如流率传感器和井底压力传感器)。数据处理系统 309 可以与地面单元 134 合并,

和 / 或与地面单元 134 一起工作。数据处理系统 309 执行图 4 中示出并在此描述的处理。如本领域技术人员将理解, 数据处理系统 309 包括数据处理功能 (例如, 一个或多个微处理器、关联存储器、以及其它硬件和 / 或软件), 以实现这里描述的公开内容。

[0077] 数据处理系统 309 可以由工作站或位于现场 301 的其它合适的数据处理系统来实现。可替换地, 数据处理系统 309 可以由分布式数据处理系统实现, 其中数据通过通信链接 (典型地为卫星链接) (优选实时地) 传送到远程位置, 以进行这里描述的数据分析。数据分析可以在工作站或其它合适的数据处理系统 (例如计算机簇或计算网格) 执行。此外, 本公开的数据处理功能可以存储在数据存储设备 (例如一个或多个光盘或其它可手持非易失性存储设备、或可通过网络访问的服务器) 上, 并且按照需要加载到合适的数据处理系统上, 以如这里所描述的在其上执行。

[0078] 图 4.1 是描绘执行油田作业的方法 400.1 的流程图。该方法包括 420 执行压裂作业 (实际或模拟), 422 在井眼附近产生 DFN, 424 产生通过 DFN 的泄油区的深度, 426 限定至少一个开采参数, 以及 428 执行开采作业。

[0079] 图 4.2 描绘了执行开采作业的方法 400.2。这一开采作业可以与图 4.1 的开采作业 428 相同。在方法 400.2 的版本中, 开采作业是模拟的。如图 4.2 所示, 方法 400.2 包括 421 产生通过离散裂缝网络的流率, 423 基于流率产生离散裂缝网络的压力分布情况, 以及 425 基于压力分布情况产生开采速度。该方法还可以包括 427 验证开采速度。该方法可以具有其它特征, 并且可以以任何顺序执行。

[0080] 执行压裂作业 420 包括在井眼附近产生裂缝, 并且在井眼附近限定水力裂缝网络。这个压裂作业可以通过例如如图 3 所示实际注入流体来执行。还可以使用水力裂缝模拟器来模拟对井的水力压裂。模拟可以包括在井眼附近产生裂缝网络。在美国专利申请 No. 20100307755 中提供了离散裂缝网络技术。来自实际或模拟水力压裂的数据可以用来产生描述所得 DFN 的数据。

[0081] 可以由图 5 所示的计算机产生的图像来视觉呈现水力裂缝模拟 530。水力裂缝模拟 530 包括形成水力裂缝网络 536 的多个裂缝 534。裂缝网络 536 中描绘了裂缝网络 536 的特征, 例如浆料 538、流体 540 和堤岸 542。

[0082] 产生 DFN422 包括从水力裂缝网络外推裂缝数据。可以通过裂缝数据的外推来产生 DFN。可以从水力裂缝模拟 530 外推裂缝数据。这个数据可以自动输出以形成开采网络显现 532, 如箭头 533 所描绘。图 5 示出了从水力裂缝模拟 530 输出到开采网络显现 532 的数据的示例。开采网络显现 532 提供了从所测量的裂缝数据创建模拟水力裂缝网络成为等效 DFN 网络的例子。可以执行该输出以按照可以由开采模型使用的格式创建 DFN535。

[0083] 在图 5 所示的例子中, DFN535 包括分支 544 和交叉点 (或裂缝端部) 546。这些裂缝分支 544 和交叉点 546 提取水力裂缝模拟 530 中描绘通过裂缝网络 536 的流体流动的部分。其余裂缝 534 被消除。

[0084] DFN535 的格式对于每个裂缝分支 544 处的每个属性考虑唯一的平均值。裂缝分支 544 被限定为连接两个交叉点 536 的平面。这些交叉点 536 可以是裂缝交叉点, 或裂缝交叉点和端部。每个裂缝分支 544 处的属性可以是例如分支极点的空间坐标; 分支位置处的平均传导率、平均高度、平均储层压力; 和 / 或分支位置处的平均储层渗透率。

[0085] 可以由本模型来使用由交叉点 546 和分支 544 对 DFN535 的描述, 来计算交叉点

546 处的压力。这一描述也可以使用分支 544 以便使两者都连接到交叉点 546 并且计算从相邻基质块的开采。

[0086] 返回参考图 4, 产生 424 通过 DFN535 的泄油区的深度的步骤可以使用基质块来执行。如图 6 所示, 图 5 的开采网络显现 532 被修改为描绘修改后的 DFN535' 的开采网络显现 532, 其中在每个裂缝分支 544 的前端有基质块 648, 如图 6 所示。每个基质块具有深度 650。

[0087] 开采网络显现 532' 提供了在所有分支 544 的每一侧将被耗尽的基质深度 650 的产生。修改后的 DFN535' 可以用于为每个基质块 648 自动或手动产生泄油区 650 的深度。这可以以 (不与任何储层边界接触的) 给定基质块的实际总体积可以被引流的方式完成。

[0088] 图 7 示意性地描绘了流体通过基质块的流动。这个附图图解了等价块长度的定义和等价块深度的计算。在所示出的例子中, 对于由相同长度的四个裂缝分支 544 包围的方形基质块 648.1, 可以假定基质块 648 的每个四分之一区域 752 可以被其所接触的裂缝分支 544 耗尽。图中描绘了基质块 648 的被耗尽的体积 754.1 和要被耗尽的等价块深度 755。

[0089] 假定从基质块 648.1 到裂缝分支 544 的线性流动 (如这里将进一步详细描述), 还可以假定基质块 648 的这个四分之一区域 752 具有裂缝分支 544 的长度 L 。所以, 基质块 648.2 的这个“四分之一区域”752 的深度必须等于块长度 L 的四分之一 (或者说是 $L/4$), 以便要被耗尽的总体积相同。如箭头 733 所指示, 使用线性流动近似, 可以确定要被耗尽的基质块 648.2 的体积 754.2 的等价块深度 $L/4$ 。可以使用更复杂的块形状, 但是可能会涉及更加复杂的技术。

[0090] 再次参考图 4, 限定 426 一个或多个开采参数的步骤可以通过获得用户输入来执行。用户可以限定一个或多个开采参数, 以在模拟中考虑。用户可以基于某种标准或根据需要选择这些开采参数。可以选择的开采参数的例子包括井底压力 (BHP)、储层条件下的储层流体粘度、储层条件下的储层流体压缩率、要模拟的开采的持续时间, 以及其它。

[0091] 执行开采作业的步骤 428 包括基于泄油区的深度和至少一个开采参数从地下地层开采流体。开采作业可以是实际的或模拟的。实际开采作业包括如图 1.4 所示将流体开采到地面。模拟开采可以使用开采模拟来执行。还可以提供开采结果的显现。这样的显现可以使得用户能够视觉看到开采衰减和累积开采量, 而且还能够显现裂缝网络和基质块中的压力场的动力学。图 8.1-8.3 提供了开采数据随时间 (例如 140 天) 变化的显现的例子。

[0092] 图 8.1 是描绘开采速度 856.1 的曲线图 800.1。曲线图 800.1 绘制了每天的开采量 (Mscf/d) (y 轴) 相对于以天为单位的时间 t (x 轴) 的关系。图 8.2 是描绘累积开采量 856.2 的曲线图 800.2。曲线图 800.2 描绘了累积开采量 P (MMscf) (y 轴) 相对于时间 t (x 轴) 的关系。图 8.3 是描绘储层压力 (z 轴) 相对于距离 x (m) (x 轴) 和距离 y (m) (y 轴) 的关系以及裂缝网络 858 中和基质块 848 中的压力的三维曲线图 800.3。可以提供这些和其它描绘图。可以基于这些开采估计来调整开采作业。

[0093] 开采作业

[0094] 开采作业 (428 和 / 或 400.2) 将分三部分来描述。首先, 给出在分析及其分析解中使用的方程。第二, 提供关于该模型的传导率的效果, 以及针对高和低传导率涉及单个裂缝分支的例子。第三, 提供模型的有效性和解决问题的方法, 例如传导率。

[0095] 1. 分析解

[0096] 可以使用控制方程和分析解来确定开采速度。将用于多孔介质中可压缩流体的连续性方程应用于基质和裂缝两者。在裂缝网络中,连续性方程可以如下重写:

[0097]

$$\frac{\partial}{\partial x_f} (\rho Q_f(x_f, t)) = -\rho Q_{mf}(x_f, t) \quad (1)$$

[0098] Q_{mf} 是从基质到储层的流率, Q_f 是裂缝内的流率, ρ 是流体密度, x_f 是沿裂缝的轴。假定裂缝渗透率(传导率除以宽度)如此之大,以致于对于开采模拟所考虑的时间尺度(几天到几年),连续性方程的瞬变项可以忽略。可以假定裂缝内的达西流率。

[0099]

$$\rho Q_{mf}(x_f, t) = -\frac{M}{2RT} \frac{\partial}{\partial x_f} \left(-HC \frac{\partial m(P_f)}{\partial x_f} \right) \quad (2)$$

[0100] P_f 是裂缝内的压力, C 是传导率, T 是温度。函数 m 是拟压力。参见 Al-Hussainy 等人., "The Flow of Real Gases Through Porous Media", Journal of Petroleum Technology, 1966, pp. 624-36。

[0101]

$$m(P_f) = 2 \int_{P_{LB}}^{P_f} \frac{P}{\mu(P)Z(P)} dP \quad (3)$$

[0102] 在基质内,用于可压缩流体的连续性方程取下面的形式。

[0103]

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{k_m P_m}{\mu(P_m)Z(P_m)} \frac{\partial P_m}{\partial x} \right) = \frac{\phi_m c_t(P_m)}{Z(P_m)} P_m \frac{\partial P_m}{\partial t} \quad (4)$$

[0104] P_m 是基质内的压力, k_m 是基质渗透率, c_t 是流体压缩率, μ 是粘度, Z 是体积因子, ϕ_m 是基质的孔隙度。为了简化,方程 4 可以重写为:

[0105]

$$\frac{\partial^2 m}{\partial x_m^2} = \frac{1}{a} \frac{\partial m}{\partial t} \quad (5)$$

[0106] a 在方程 6 中定义。

[0107]

$$a = \frac{k_m}{\phi_m \mu(P_m) c_t(P_m)} \quad (6)$$

[0108] 为了计算 Q_{mf} , 可以求解方程 (5), 其中 x_m 是沿垂直于裂缝 964 及其坐标 x_f 的轴的坐标。图 9 提供了裂缝 964 和基质块 648 中的坐标的图解说明。

[0109] 可以使用拉普拉斯变换来求方程 5 的解, 例如在 Jeannot, Yves. "Thansfert Thermique", Textbook, Ecole des Mines de Nancy, 2009. <http://www.thermique55.com/>

principal/therrnique.pdf; 以及 Bello, R. O., "Rate Transient Analysis in Shale Gas Reservoirs with Transient Linear Behavior", 博士论文, 2009 中所说明的。这里提供了用于所给出的方法的方程、实现、算法和变量的详细列表。

[0110] 对于恒定裂缝压力, 可以确定基质中的压力分布情况。该模型的第一个假定是可以下面的实际气体方程来描述气体特性:

$$[0111] \quad \rho = \frac{M}{RT} \left(\frac{P_m}{Z(P_m)} \right) \text{基质内} \quad (7)$$

$$[0112] \quad \rho = \frac{M}{RT} \left(\frac{P_f}{Z(P_f)} \right) \text{裂缝网络内} \quad (8)$$

[0113] 用于基质块内部的线性气体流动的基本方程是

[0114]

$$\frac{\partial}{\partial x_m} \left(\frac{P_m}{\mu(P_m)Z(P_m)} \frac{\partial P_m}{\partial x_m} \right) = \frac{P_m \varphi_m c_t(P_m)}{Z(P_m)k_m} \frac{\partial P_m}{\partial t} \quad (9)$$

[0115] 其中

[0116]

$$c_t(P_m) = \frac{1}{P_m} - \frac{1}{Z(P_m)} \frac{\partial Z(P_m)}{\partial P_m} \quad (10)$$

[0117] 下面对拟压力的定义将简化前面的方程的解

[0118]

$$m(P_m) = 2 \int_{P_{LB}}^{P_m} \frac{P}{\mu(P)Z(P)} dP \quad (11)$$

[0119] 于是方程 (11) 变为

[0120]

$$\frac{\partial m_*^2}{\partial x_m^2} = \frac{1}{a} \frac{\partial m_*}{\partial t} \quad (12)$$

[0121] 其中

[0122]

$$a = \frac{k_m}{\varphi_m \mu(P_m) c_t(P_m)} \quad (13)$$

$$[0123] \quad m_* = m(P_m) - m(P_{m_0}) = m(P_m) - m_{m_0} \quad (14)$$

并且边界条件为

$$[0124] \quad m_*(x_m=L, t) = m_*(x_m=-L, t) = m_r - m_{m_0} \quad (15)$$

[0125]

$$\frac{\partial m_*}{\partial x_m}(0, t) = 0 \quad (16)$$

$$[0126] \quad m_*(x_m, t_0) = 0 \quad (17)$$

[0127] 对方程 (15) 进行拉普拉斯变换给出

[0128]

$$\frac{\partial \theta^2}{\partial x_m^2} - q^2 \theta = 0 \quad (18)$$

[0129] 其中

[0130]

$$q^2 = \frac{s}{a} \quad (19)$$

[0131] 对于如下形式的解

$$\theta(x_m, s) = A \cosh(qx_m) + B \sinh(qx_m) \quad (20)$$

方程 (16) 的拉普拉斯变化是

[0133]

$$\frac{\partial \theta}{\partial x_m}(0, s) = 0 \quad (21)$$

[0134] 其给出 $B=0$, 因此

$$\theta(x_m, s) = A \cosh(qx_m) \quad (22)$$

[0136] 现在, 假定裂缝网络中的压力几乎恒定。

$$m_f(x_f, t) = m_f(x_f)$$

[0138] 因此, 对方程 (15) 进行拉普拉斯变化给出

[0139]

$$\theta(x_m = L, s) = \theta(x_m = -L, s) = \frac{m_f - m_{m_0}}{s} \quad (23)$$

[0140] 由此给出

[0141]

$$A = \frac{m_f - m_{m_0}}{s \cosh(qL)} \quad (24)$$

[0142] 并且

[0143]

$$\theta(x_m, s) = \frac{m_f - m_{m_0}}{s \cosh(qL)} \cosh(qx_m) = \frac{m_f - m_{m_0}}{s} \frac{e^{qx} + e^{-qx}}{e^{qL}(1 + e^{-2qx})} \quad (25)$$

[0144] 通过使用 $\frac{1}{1 + e^{-2qx}}$ 泰勒级数展开, 可以提供下面的结果:

[0145]

$$\theta(x_m, s) = \frac{m_f - m_{m_0}}{s} (e^{-q(L-x_m)} + e^{-q(L+x_m)}) \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n e^{-2nqL} \quad (26)$$

[0146] 逆拉普拉斯变换给出

[0147]

$$m(P_m) - m_{m,0} = \quad (27)$$

$$(m_f - m_{m,0}) \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \left(\operatorname{erfc} \left[\frac{(2n+1)L - x_m}{2\sqrt{a(t-t_0)}} \right] + \operatorname{erfc} \left[\frac{(2n+1)L + x_m}{2\sqrt{a(t-t_0)}} \right] \right)$$

[0148] 然后可以确定恒定裂缝压力下从基质到裂缝的流率。由达西定律给出从基质到裂缝的流率：

[0149]

$$\rho Q_{mf}(x_f, t) = -\frac{MHk_m}{2RT} \sum_{k=1}^2 \frac{\partial m(P_m)}{\partial x_m} \Big|_{x_m=-L_k, L=L_k} \quad (28)$$

[0150] L_k 对应于裂缝 k 侧上的泄油区的最大长度。

[0151]

$$\frac{\partial m(P_m)}{\partial x_m} = \frac{(m_f - m_{m,0})}{\sqrt{\pi a(t-t_0)}} \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \left(e^{-\left(\frac{(2n+1)L - x_m}{2\sqrt{a(t-t_0)}}\right)^2} - e^{-\left(\frac{(2n+1)L + x_m}{2\sqrt{a(t-t_0)}}\right)^2} \right) \quad (29)$$

[0152] 这给出

[0153]

$$\rho Q_{mf}(x_f, t) = \quad (30)$$

$$(m_f - m_{m,0}) \frac{MHk_m}{2RT\sqrt{\pi a}} \sum_{k=1}^2 \frac{1}{\sqrt{(t-t_{0,k})}} \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \left(e^{-\left(\frac{(n+1)L_k}{\sqrt{a(t-t_{0,k})}}\right)^2} - e^{-\left(\frac{nL_k}{\sqrt{a(t-t_{0,k})}}\right)^2} \right)$$

[0154] 可以确定交叉点 i 和 j 之间的裂缝分支内的流动。裂缝网络内的流动由下述方程描述：

[0155]

$$\frac{\partial}{\partial x_f} (\rho Q_f(x_f, t)) = -\rho Q_{mf}(x_f, t) \quad (31)$$

[0156] 其中 Q_{mf} 是从基质到裂缝的流率 (m^3/s)， Q_f 是来自裂缝的通量 (m^2/s)。在气体动力可以由所附实际气体方程描述的假设下，该方程变成

[0157]

$$\frac{M}{2RT} \frac{\partial}{\partial x_f} \left(-HC \frac{\partial m(P_f)}{\partial x_f} \right) = -\rho Q_{mf}(x_f, t) \quad (32)$$

[0158] 边界条件如下：

$$[0159] \quad m(P_f(x_f=0)) - m_{m,o} = m_f(x_f=0) - m_{m,o} = m_{f,i} - m_{m,o} = m_{f*,i} \quad (33)$$

$$[0160] \quad m(P_f(x_f=L_f)) - m_{m,o} = m_f(x_f=L_f) - m_{m,o} = m_{f,j} - m_{m,o} = m_{f*,j}$$

[0161] 其中 L_f 是两个交叉点之间的裂缝的长度。使用下述公式：

$$[0162] \quad m_{f*} = m_f(x_f) - m_{m,o} \quad (34)$$

[0163] 并且将方程 (30) 引入方程 (32), 获得下述方程：

[0164]

$$\frac{\partial}{\partial x_f} \left(\frac{\partial m_{f*}}{\partial x_f} \right) - \gamma^2 m_{f*} = 0 \quad (35)$$

[0165] 其中

[0166]

$$\gamma^2 = \frac{k_m}{C\sqrt{\pi a}} \sum_{k=1}^2 \frac{1}{\sqrt{(t-t_{0,k})}} \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \left(e^{-\left(\frac{nL_k}{\sqrt{a(t-t_{0,k})}}\right)^2} - e^{-\left(\frac{(n+1)L_k}{\sqrt{a(t-t_{0,k})}}\right)^2} \right) \quad (36)$$

[0167] 方程 (35) 的解具有如下形式

[0168]

$$m_{f*} = A e^{\gamma x_f} + B e^{-\gamma x_f} \quad (37)$$

[0169] 并且方程 (34) 给出

[0170]

$$m_f(x_f) = m_{m,o} + \left(\frac{m_{f*,i} e^{-\gamma L_f} - m_{f*,j}}{e^{-\gamma L_f} - e^{\gamma L_f}} \right) e^{\gamma x_f} + \left(\frac{m_{f*,j} - m_{f*,i} e^{\gamma L_f}}{e^{-\gamma L_f} - e^{\gamma L_f}} \right) e^{-\gamma x_f} \quad (38)$$

[0171] 也可以确定例如分支 i, j 的交叉点 i 处的流率。

[0172]

$$\rho Q_{f,i,j} = -\frac{MHC_{i,j}}{2RT} \left. \frac{\partial m_f}{\partial x_f} \right|_{x_f=0} \quad (39)$$

[0173] 当将方程 (48) 引入方程 (39) 时

[0174]

$$\rho Q_{f,i,j} = -\frac{\gamma MHC_{i,j}}{2RT} \left[\frac{m_{f*,i}(e^{-\gamma L_f} + e^{\gamma L_f}) - 2m_{f*,j}}{e^{-\gamma L_f} - e^{\gamma L_f}} \right] \quad (40)$$

[0175] 如果这是来自管子的元件, 则该方程变为

[0176]

$$\rho Q_{f,i,j} = -\frac{MHC_{i,j}}{2RT} \left[\frac{m_{f*,i} - m_{f*,j}}{L_f} \right] \quad (41)$$

[0177] 也可以确定裂缝之间的交叉点处的质量平衡

[0178]

$$\sum_{j=1}^{N_{ij}} \rho Q_{f,i,j} = 0 \quad (42)$$

[0179] 其中 N_{ij} 是达到该交叉点的分支的数量。

[0180]

$$\sum_{j=1}^{N_{ij}} \rho Q_{f,i,j} = \sum_{j=1}^{N_{ij}} -\frac{\gamma_{ij} H_{ij} C_{ij} M}{2RT} \left[\frac{(m_{f,i} - m_{m_0,ij})(e^{-\gamma L_{f,ij}} + e^{\gamma L_{f,ij}}) - 2(m_{f,j} - m_{m_0,ij})}{e^{-\gamma L_{f,ij}} - e^{\gamma L_{f,ij}}} \right] \quad (43)$$

$$= 0$$

[0181] 这可以重新整理为如下形式

[0182]

$$m_{f,i} \sum_{j=1}^{N_{ij}} \frac{\gamma_{ij} H_{ij} C_{ij} (e^{-\gamma L_{f,ij}} + e^{\gamma L_{f,ij}})}{e^{-\gamma L_{f,ij}} - e^{\gamma L_{f,ij}}} - \sum_{j=1}^{N_{ij}} m_{f,j} \frac{\gamma_{ij} H_{ij} C_{ij}}{e^{-\gamma L_{f,ij}} - e^{\gamma L_{f,ij}}} \quad (44)$$

$$= \sum_{j=1}^{N_{ij}} m_{m_0,ij} \frac{\gamma_{ij} H_{ij} C_{ij} (e^{-\gamma L_{f,ij}} + e^{\gamma L_{f,ij}} - 2)}{e^{-\gamma L_{f,ij}} - e^{\gamma L_{f,ij}}}$$

[0183] 还可以更新通过基质块的流体流动的时间函数 $t_{o,k}(t)$ 。可以将目标函数 F 定义为到目前为止从每个基质块的每个面开采的实际质量,和在 DFN 内的当前压力场已变得恒定并且分析解中考虑的初始时间已变得恒定的情况下将开采的质量,之间的差,并且等于 $t_{o,k}(t)$ 。

[0184]

$$F_k(t, t_{o,k}(t)) \quad (45)$$

$$= \int_0^t \rho Q_{tot,ij,k}(\tau, P(\tau), t_{o,k}(\tau)) d\tau$$

$$- \int_{t_{o,k}(t)}^t \rho Q_{tot,ij,k}(\tau, P(t), t_{o,k}(t)) d\tau$$

[0185] 或者

$$F_k(t, t_{o,k}(t)) = M_{tot,k}(t) - \int_{t_{o,k}(t)}^t \int_0^{L_f} \rho Q_{mf,k}(\tau, P_f(x_f, t), t_{o,k}(t)) d\tau dx_f \quad (46)$$

[0187] 可以通过求使得 $F_{o,k}(t)=0$ 的 $t_{o,k}(t)$ 的值来计算初始时间 $t_{o,k}(t)$ 。因此,从分支

的 k 面开采的总质量等于在特定条件（例如，在裂缝中的当前压力条件已变得相同并且从初始开采时间 $t_{o,k}(t)$ 起已变得恒定，和 / 或在初始时间 $t_{o,k}(t)$ 之前没有从这一面开采）下到目前为止应当已由同一分支开采的质量。

[0188] 对 $t_{o,k}(t)$ 的值的搜索是通过牛顿迭代算法：

[0189]

$$t_{0,k}^{n+1}(t) = t_{0,k}^n(t) - \frac{F_k^n(t, t_{0,k}^n(t))}{F_k'^n(t, t_{0,k}^n(t))} \text{ with } F_k'^n(t, t_{0,k}^n(t)) = \frac{\partial F_k^n(t, t_{0,k}^n(t))}{\partial t_{0,k}^n(t)} \quad (46)$$

[0190] 使用数值梯度来计算导数 $\frac{\partial F_k^n(t, t_{0,k}^n(t))}{\partial t_{0,k}^n(t)}$ 其中：

[0191] a= 变量

[0192] c_t = 压缩率 (Pa^{-1})

[0193] C= 传导率 ($\text{m}^2 \cdot \text{m}$)

[0194] $F_{o,k}$ = 目标函数 (m^3)

[0195] H= 裂缝高度 (m)

[0196] k_m = 基质渗透率 (m^2)

[0197] L= 泄油区的最大长度 (m)

[0198] m= 实际气体拟压力 (Pa/s)

[0199] m^* = 归一化实际气体拟压力 (Pa/s)

[0200] m_f = 裂缝中的实际气体拟压力 (Pa/s)

[0201] m_f^* = 裂缝中的归一化实际气体拟压力 (Pa/s)

[0202] m_m = 基质中的实际气体拟压力 (Pa/s)

[0203] m_m^* = 基质中的归一化实际气体拟压力 (Pa/s)

[0204] $m_{m,0}$ = 基质中的初始实际气体拟压力 (Pa/s)

[0205] M= 摩尔质量 (kg/mol)

[0206] P_m = 基质压力 (Pa)

[0207] P_{m0} = 初始基质压力 (Pa)

[0208] P_f = 初始裂缝压力 (Pa)

[0209] P_{LB} = 低基准压力 (Pa)

[0210] Q_{tot} = 从基质块到裂缝的总流率 (m^3/s)

[0211] Q_{mf} = 从基质块到裂缝的本地流率 (m^2/s)

[0212] Q_f = 基质内的流率 (m^3/s)

[0213] R= 普适气体常数 ($\text{J}/\text{mol}/\text{K}$)

[0214] t= 时间 (s)

[0215] $t_{o,k}$ = 初始开采时间 (s)

[0216] T= 温度 (K)

[0217] x_f = 裂缝中的坐标 (m)

[0218] x_m = 基质中的坐标 (m)

[0219] Z= 体积因子

[0220] μ = 粘度 ($\text{Pa} \cdot \text{s}$)

[0221] $\Phi_m =$ 孔隙度

[0222] $\rho =$ 储层流体密度 (kg/m^3)

[0223] $y =$ 变量

[0224] 然后, 在 $t_{o,k}(t)$ 已知的情况下, 可以如下计算压力分布:

[0225]

$$\rho Q_{mf}(x_f, t) = (m_f - m_{m,o}) \frac{MHk_m}{2RT\sqrt{\pi a}} \sum_{k=1}^2 \frac{1}{\sqrt{(t-t_{0,k})}} \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \left(e^{-\left(\frac{(n+1)L_k}{\sqrt{a(t-t_{0,k})}}\right)^2} - e^{-\left(\frac{nL_k}{\sqrt{a(t-t_{0,k})}}\right)^2} \right) \quad (47)$$

[0226] 这个解在压力方面是线性的, 方程 2 可以被积分并求解。

[0227]

$$m_f(x_f) = m_{m,o} + \left(\frac{m_{f*,i} e^{-\gamma L_f} - m_{f*,j}}{e^{-\gamma L_f} - e^{\gamma L_f}} \right) e^{\gamma x_f} + \left(\frac{m_{f*,j} - m_{f*,i} e^{\gamma L_f}}{e^{-\gamma L_f} - e^{\gamma L_f}} \right) e^{-\gamma x_f} \quad (48)$$

[0228]

$$y^2 = \frac{k_m}{C\sqrt{\pi a}} \sum_{k=1}^2 \frac{1}{\sqrt{(t-t_{0,k})}} \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \left(e^{-\left(\frac{nL_k}{\sqrt{a(t-t_{0,k})}}\right)^2} - e^{-\left(\frac{(n+1)L_k}{\sqrt{a(t-t_{0,k})}}\right)^2} \right) \quad (49)$$

[0229] 已知网络内的压力分布, 可以利用达西定律计算开采速度。

[0230] 可以在对时间步没有约束的情况下对各种裂缝网络进行计算。在一些情况下, 例如在以恒定 BHP 进行开采并且传导率高的情况下, 来自基质的流动可以基于裂缝内的压力保持恒定的假设。但是实际上, 只有裂缝分支的一部分可以具有高传导率。计算的例子在 Cipolla, C. L., Lolon, E. P., Mayerhofer, M. J., "Reservoir Modeling and Production Evaluation in shale-Gas Reservoirs", 2009 年 12 月 7 日在卡塔尔多哈召开的 International Petroleum Technology Conference (国际石油技术会议) 上提交的 SPE 论文 13185 中给出。

[0231] 分析解的有效性

[0232] 可以通过对解进行分析以确定其在给定地层中的应用, 来验证 427 分析解。为了研究针对裂缝传导率的不同值的分析模型的有效性, 可以分析复杂网络的单个裂缝分支处的压力和开采的演化。这一研究可以包括两组等间距的平行裂缝, 如图 10 所示。该附图描

述了将要分析的井眼 1074 附近的 DFN1072 中的单个分支 1070。DFN1072 的基质块 1048 被描绘为具有从基质块 1048 到裂缝分支 1070 的流率 1076。

[0233] 对于在大约 0.0001mD 的储层中的裂缝网络中的高传导率（有限）（例如，大约 2500mD. ft (762mD. m)），BHP 几乎瞬时在网络中扩散，并且从那里开始，与初始储层压力和 BHP 之间的压力差相比，可以忽略 DFN 内部的压力变化。

[0234] 图 11.1 和 11.2 是描绘对于 1 天和 365 天，储层压力 $P(z$ 轴) 与距离 $x(m)$ (x 轴) 和距离 $y(m)$ (y 轴) 之间的关系的三维曲线图 1100.1 和 1100.2。该附图描绘了对于高传导率 DFN 在两个不同的开采时间的 DFN 压力和初始储层压力 1178。可以提供这些和其它描绘。可以基于开采估计来调整开采作业。

[0235] 如图 12 所示，所选裂缝分支（例如图 10 的分支 1070）内的压力在十年的开采期间可以被视为恒定。该附图描绘了在高传导率的情况下，压力 ($P_{m, o}-P_f$) (y 轴) 和按天计的初始时间 T (y 轴) 相对于按天计的时间 t (例如在三年的开采期间) (x 轴) 的关系的曲线图 1200。针对压力产生的线 1280 和针对时间延迟产生的线 1281 几乎是平的。

[0236] 图 13 示出了 DFN 中这一几乎恒定的压力的结果，其中（从基质块到裂缝分支（例如图 10 中的 1048 到 1070））开采的累积体积朝着由质量平衡限定的最大可采体积（或适当位置处的初始气体体积）收敛。图 13 是描绘累积开采量 $P(y$ 轴) 相对于时间 $t(x$ 轴) 的关系的曲线图 1300，结果是朝着最大可采体积 1382 延伸的开采曲线 1384。该附图描绘了在高传导率的情况下从裂缝分支的累积开采量相对于时间的关系。因为在此例中，我们在考虑可压缩流体所以可以在地表条件下进行体积的测量。这一收敛指示在高传导率 DFN 的情况下分析解验证了质量平衡。对于低传导率（或有限传导率）DFN (50mD. ft (15.24mD. ft)) 进行相同分析可以具有不同的结论。

[0237] 如图 14.1 和 14.2 所示，与该问题的压力范围（例如，BHP，初始储层压力等）相比，DFN 中的压力可以改变。这个图描绘了对于低传导率 DFN，在不同的开采时间，DFN 内部的压力。图 14.1 和 14.2 是分别描绘对于 1 天和 365 天，储层压力 $P(z$ 轴) 相对于距离 $x(x$ 轴) 和距离 $y(y$ 轴) 的关系的三维曲线图 1400.1 和 1400.2。该附图描绘了对于高传导率 DFN，在不同的开采时间，DFN 内部的压力。还描绘了初始储层压力 1478 和 DFN 的压力 1435。

[0238] 如图 15 所示，在裂缝分支中记录的压力相对于时间的关系上可以看到这一压力变化。如图 15 所示，在十年的开采期内可以将所选裂缝分支（例如图 10 的分支 1070）中的压力视为恒定。该附图描绘了在低传导率（无限）的情况下，压力 ($P_{m, o}-P_f$) (y 轴) 和按天计的时间延迟 T (y 轴) 随按天计的时间 t (例如三年开采期内) (x 轴) 的变化曲线图 1500。对于归一化压力产生的线 1580 和对于时间延迟产生的线 1581 几乎是平的。还描绘了边界条件的变化 1584。

[0239] DFN 中压力的这一变化意味着分析解中的恒定压力边界条件的假定可能需要进一步的分析以确认有效性。结果是所计算的来自基质的流率可能被低估，并且质量平衡可能不正确，如图 16 所示。图 16 是描绘累积开采量 $P(y$ 轴) 相对于时间 $t(x$ 轴) 的关系的曲线图 1600，结果是朝着最大可采体积 1682 延伸的开采曲线 1684。这个附图描绘了在低传导率的情况下从裂缝分支的累积开采量相对于时间的关系。还示出了开采曲线 1684 和最大可采体积 1682 之间的误差 1686。

[0240] 裂缝网络中的低扩散率可能导致块的开采的“延迟”，这取决于它离井眼有多远（或者它如何与井眼相连）。这一观察是将分析解的有效性延伸到低传导率裂缝的方法的起点。

[0241] 分析解的有效性的扩展

[0242] 可以扩展这一分析解的有效性，以便以使得到目前為止从基质块开采的体积等于在 DFN 内当前压力条件下根据分析解应当已开采的体积的方式，修改“初始”时间 $t_0(t_{0,k}(t))$ 。通过在每一时间步对每个裂缝的每一侧进行这一搜索，迫使分析解满足质量平衡。通过定义目标函数 F 以使其最小化来开始对于 t_0 的搜索。

[0243]

$$F_k(t, t_{0,k}(t)) = M_{tot,k}(t) - \int_0^t \int_0^{L_f} \rho Q_{mf,k}(\tau, P_f(x_f, \tau), t_{0,k}(t)) d\tau dx_f = 0 \quad (50)$$

[0244] M_{tot} 是在时间 t 从裂缝分支的 k 侧从基质块开采的体积。将其与在该裂缝分支的长度上来自基质的流率从 $t_{0,k}$ 到 t 的积分进行比较。对使得 F 等于零的 $t_{0,k}$ 的搜索，可以使用方程 51 所描述的牛顿 - 拉普森迭代算法。

$$[0245] \quad t_{0,k}^{n+1}(t) = t_{0,k}^n(t) - \frac{F_k^n(t, t_{0,k}^n(t))}{F_k'^n(t, t_{0,k}^n(t))}, \text{ 其中}$$

$$F_k'^n(t, t_{0,k}^n(t)) = \frac{\partial F_k^n(t, t_{0,k}^n(t))}{\partial t_{0,k}^n(t)} \quad (51)$$

[0246] 通过数值梯度来计算函数 $F_{0,k}$ 的导数。如果 $t_{0,k}$ 满足其时间边界，那么优化使用两分法。这一优化算法非常有效，因为使用前一时间步的解作为下一循环的初始猜想。从数值的观点看，近似值的计算需要时间积分，这是该模拟中最耗 CPU 的部分。以变量间最小依赖性对每个分支的每一侧应用该优化算法，使得算法的这一部分成为平行计算的候选。

[0247] 为了阐明这一方案背后的机制，可以对具有低传导率（或有限传导率）(50mD. ft (15. 24mD. ft)) 的 DFN 的单个裂缝分支使用上面的分析。在裂缝分支中记录的压力中可以看到这一压力变化，如图 17 所示。如图 17 所示，在十年的开采期内可以将所选裂缝分支（例如图 10 的分支 1070）中的压力视为恒定。该附图描绘了在低传导率（无限）的情况下，归一化压力 ($P_m, o-P_f$)（左边的 y 轴）和按天计的时间延迟 T （右边的 y 轴）随按天计的时间 t （例如三年开采期内）(x 轴) 的变化的曲线图 1700。对于归一化压力产生的线 1780 和对于时间延迟产生的线 1781 是倾斜的。

[0248] 图 17 还示出了裂缝中所计算的压力和用所提出的方法更新的初始时间 $t_{0,k}$ 。 $t_{0,k}$ 随时间的增长对于维持来自基质的流率和图 18 所示的累积开采量可能是必要的。图 18 是描绘累积开采量 (y 轴) 相对于时间 (x 轴) 的关系的曲线图 1800，结果是开采曲线 1884 朝着最大可采体积 1882 延伸。这个附图描绘了在低传导率的情况下从裂缝分支的累积开采量相对于时间的关系。

[0249] 这个附图指示该方法减少了质量平衡的误差，因为与图 16 相比，图 18 中累积开采量收敛得更接近最大可采体积，由此指示可以使用分析解扩展该方法的有效性。

[0250] 图 19 是描绘对于整个裂缝网络，在不同的时间步 t_1 (1 天)、 t_2 (200 天) 和 t_3 (3

年),由该算法计算的压力的分布和初始时间延迟 T 的图表 1900。该图表包括分别在时间步 t_1 、 t_2 和 t_3 ,针对压力的 DFN1935. 1、1935. 2 和 1935. 3 以及针对时间延迟的 DFN1935. 4、1935. 5 和 1935. 6。这个附图示出了在开采的不同时间,储层中的压力和初始时间(或“延迟”)。“压力”柱示出了储层块内的压力和裂缝网络内的压力。“初始时间”T 柱示出了由该算法计算的每个块的初始时间。

[0251] 可以使用非常规开采模型 (UPM) 来执行上面的分析。为了图解 UPM 的性能,将该模拟与来自商业储层模拟器的模拟进行比较。这一比较是使用两个不同的裂缝几何图形来完成的:单个双翼裂缝网络和“线网”裂缝网络。

[0252] 在涉及单个双翼裂缝的例子中,水力裂缝是单个对称裂缝,半段的长度为 1263ft (384. 96m),裂缝高度为 98. 4ft (19. 99m)。储层的渗透率为 0. 0001mD,孔隙度为 8%,初始储层压力为 4000psi (281. 29kg/cm),并且井底压力为 1000psi (70. 32kg/cm)。在这个例子中,体积因子 Z 和气体粘度是恒定的,并且分别等于 1 和 0. 02cP。

[0253] 图 20 是对于在 0. 005 和 5000mD. ft (1524mD. m) 之间变化的不同裂缝传导率,储层模拟和 UPM 之间的模拟累积开采量比较。图 20 表明,与穿孔(格子的中心)的距离越大,初始时间越小。

[0254] 图 20 是地表条件下的累积开采量 (y 轴) 相对于时间 t(x 轴) 的关系的曲线图 2000。该附图通过与储层模拟器的比较描绘了有效性。所得实线 2088. 1-2088. 7 和所得虚线 2089. 1-2089. 7 分别示出了在各种位置处,基于储层模拟器和该开采模型的开采量。这一曲线图 2000 指示,与穿孔的距离越大,BHP 扩散到该位置要花费的时间越长。

[0255] 对于线网裂缝网络,这种情况代表由每个正交方向上 13 条相同的裂缝构成的复杂裂缝网络,垂直井位于中间。在这个例子中,储层的渗透率为大约 0. 001mD,孔隙度为 8%,初始储层压力为 4000psi (281. 29kg/cm),并且井底压力为 1000psi (70. 32kg/cm)。在这个例子中还示出,体积因子 Z 和气体粘度是恒定的,并且分别等于 1 和 0. 02cP。

[0256] 图 21. 1 和 21. 2 提供了由各种模拟器执行的 DFN 的各种显现。该附图显示了在通过商用储层模拟器和 UPM 进行的模拟之间的比较中所使用的储层和 DFN。图 21. 1 示出了由储层模拟器如 ECLIPSE™ 描绘的 DFN2135. 1 和 2135. 2 的例子。图 21. 2 示出了使用 UPM 产生的 DFN2135. 3。所描绘的每个 DFN 可以是相同的 DFN,导致所示出的不同图像。

[0257] 图 22-24 比较在 DFN 的传导率可以变化的例子中由储层模拟器和 UPM 产生的结果。图 22 是针对双翼裂缝,对于在 0. 082mD. ft (24. 99mD. mm) 到大约 8200mD. ft (2499. 36mD. m) 之间变化的不同裂缝传导率,储层模拟器和 UPM 之间的模拟累积开采量的比较。

[0258] 图 22 显示,离穿孔(格子的中心)距离越大,初始时间越小。图 22 是地表条件下的累积开采量 (y 轴) 相对于时间 t(x 轴) 的关系的曲线图 2200。该附图描绘了通过与储层模拟器的比较进行的验证。所得实线 2288. 1-2288. 6 和所得虚线 2289. 1-2289. 6 分别示出了在各种位置处,基于储层模拟器和 UPM 的开采量。这一曲线图 2200 指示,与穿孔的距离越大,BHP 扩散到该位置要花费的时间越长。

[0259] 如这里所使用的,没有“延迟”的 UPM 意味着 UPM 使用模型的分析部分,具有等于 0 的恒定初始时间。当裂缝传导率增加时,储层模拟器和没有“延迟”的 UPM 模拟之间的差异可以减小。

[0260] 这些比较显示了特别是在低传导率的情况(更新初始时间的算法发挥主要作用)

下两种模拟器之间相当良好的一致。为了图解该算法校正初始时间的重要性,图 23.1 和 23.2 比较裂缝传导率等于 82mD. ft (24.99mD. m) 的情况下的模拟结果。

[0261] 图 23.1 是描绘地表条件下的流率的曲线图 2300.1。相对于时间 t (x 轴) 绘出了开采量 (y 轴)。所得到的线 2390.1-2390.3 分别描绘了由储层模拟器、UPM 和无延迟的 UPM 产生的模拟。图 23.2 是描绘地表条件下的当前开采量的曲线图 2300.2。相对于时间 t (x 轴) 绘出了累积开采量 P (y 轴)。所得到的线 2390.4-2390.6 分别描绘了由储层模拟器、UPM 和无延迟的 UPM 产生的模拟。这些附图描绘了商用储层模拟器、UPM 和无“延迟”UPM 之间的流率比较 (图 23.1) 和累积开采量比较 (图 23.2)。

[0262] 应当注意的是,在开发任何实际实施例时,必须做出大量特定于实现的决定,以实现开发者的特定目的,例如符合与系统相关的约束和与商业相关的约束,这些约束将对于每个实现而不同。此外,应当理解,这样的开发工作可能是复杂的,并且耗时的,然而对于本领域技术人员在本公开的启示下将只是例行的工作。此外,这里使用 / 公开的文章还可以包括一些它们引用的组分之外的组分。在发明内容部分及此详细描述中,每个数值应当被理解为由术语“大约”修饰一次 (除非已明确地如此修饰),然后再理解为没有如此修饰,除非上下文中相反指示。同样,在发明内容和此详细描述中,应当理解,所列出或描述为有用、适合等的浓度范围意在将该范围内的任何和每一个浓度,包括端点,考虑为已被陈述。例如,“范围从 1 到 10”应当被理解为指示沿着大约 1 和大约 10 之间的连续统的每个可能数值。因此,即使该范围内明确识别了特定数据点,或者该范围内没有明确识别数据点,或者仅提到几个特定项目,应当明白,发明人认为该范围内的任何及所有数据点应当被考虑为已被指定,并且发明人掌握整个范围以及该范围内所有点的知识。

[0263] 这里做出的陈述仅提供与本公开有关的信息,而不构成现有技术,并且可以描述一些阐述所公开的主题的实施例。这里所引用的所有参考文献都通过引用而将其全部内容合并到本申请中。

[0264] 已经参考一些实施例给出了前面的描述。本公开所属领域的技术人员将理解,可以在不实质性脱离本申请的原理、范围的情况下,实现所描述的结构和作业方法的变更和改变。相应地,前面的描述不应当被解释为仅属于所描述并在附图中示出的精确结构,而是应当被理解为与所附权利要求一致,并支持所附权利要求,权利要求具有其最完整最公平的范围。

[0265] 尽管上面仅描述了几个示例性实施例,但是本领域技术人员将容易地理解到,在示例性实施例内可能有许多修改而不实质上脱离本发明。相应地,所有这样的修改都意图包括在本公开如在所附权利要求书中所限定的范围之内。在权利要求书中,装置加功能的条款意图覆盖这里描述的执行所阐述的功能的结构,并且不但包括结构等同物,而且包括等同结构。因此,在固定木头部件的场境中,尽管钉子和螺丝钉可能不是结构等同物,因为钉子采用圆柱形表面来将木头部件固定在一起,而螺丝钉采用螺旋表面,但是钉子和螺丝钉可以是等同结构。除了权利要求明确使用表述“装置,用于……”和相关联的功能一起做出的限制,申请人明确表示不希望引用 35U. S. C § 112 第 6 款来对这里的任何权利要求做出任何限制。

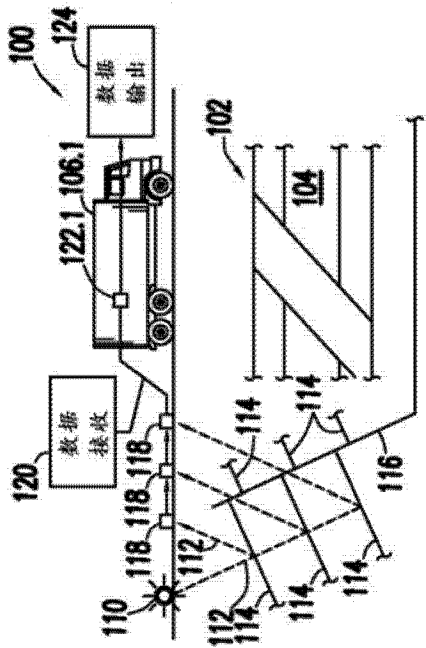


图 1.1

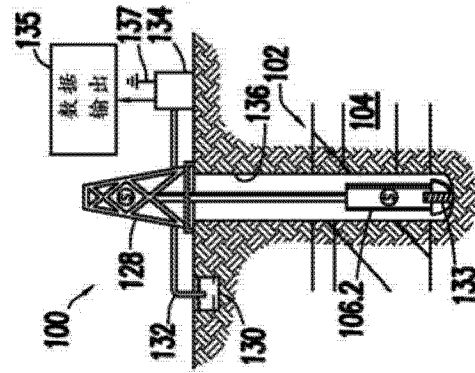


图 1.2

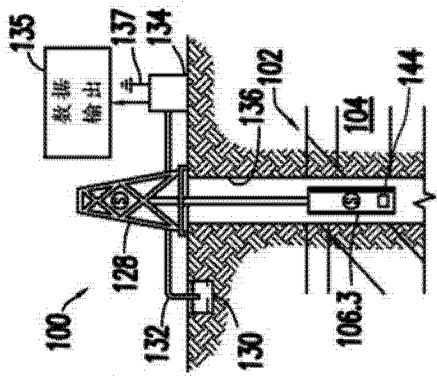


图 1.3

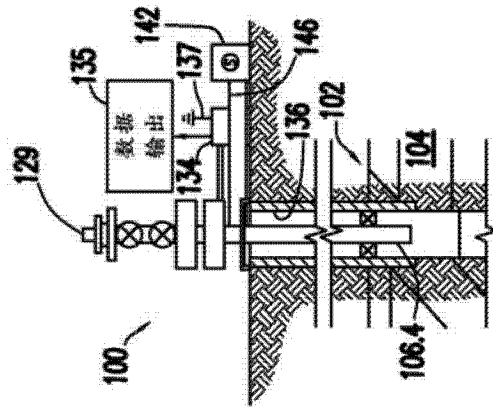


图 1.4

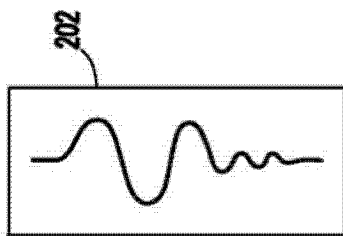


图 2.1



图 2.2

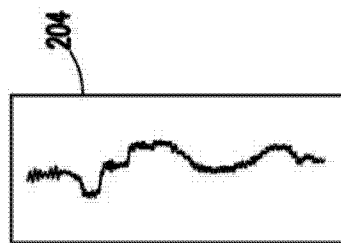


图 2.3

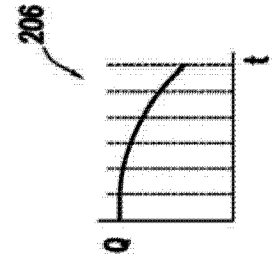


图 2.4

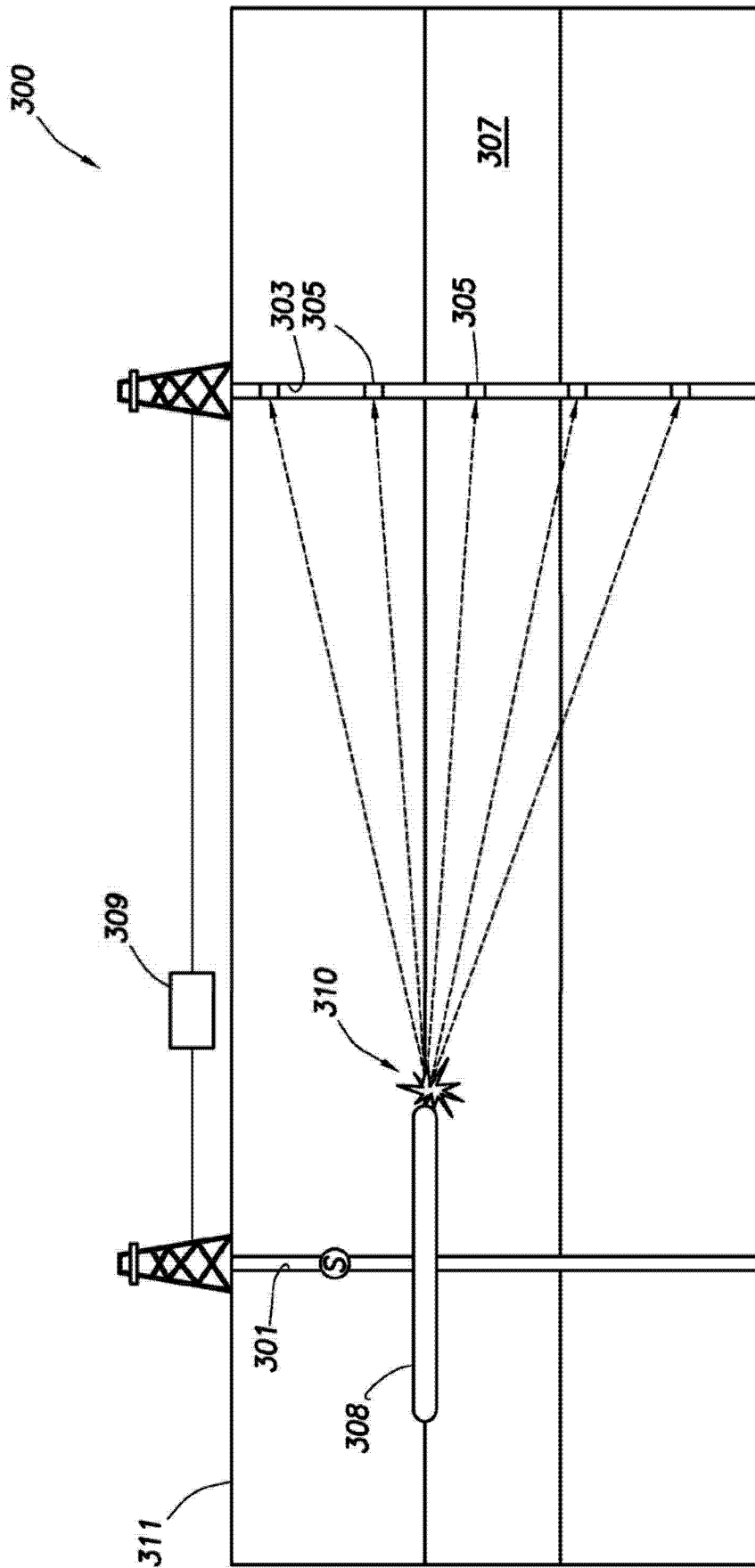


图 3

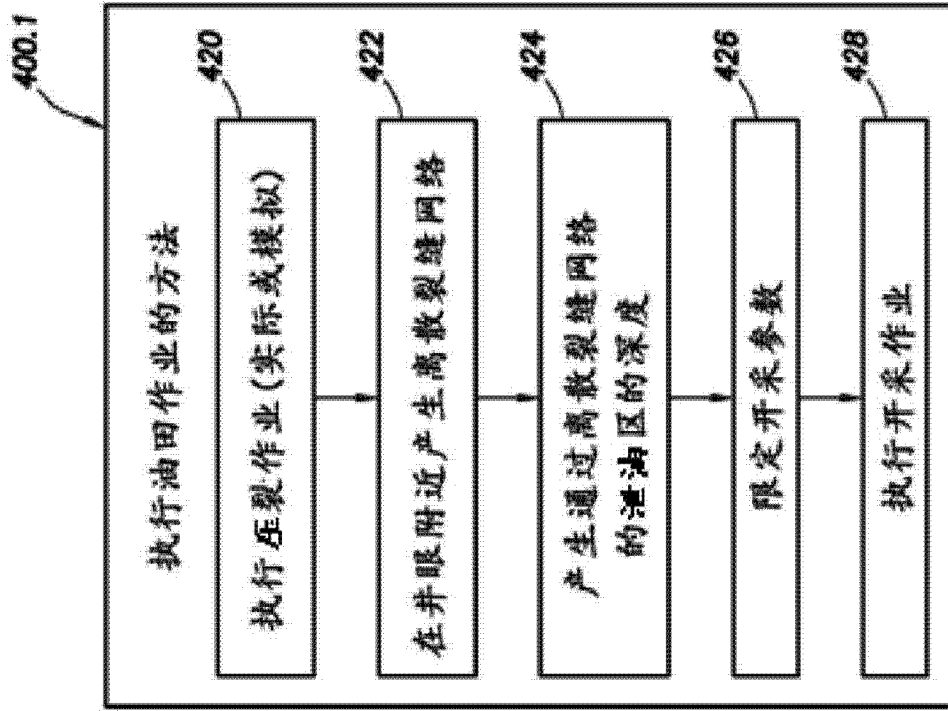


图 4.1

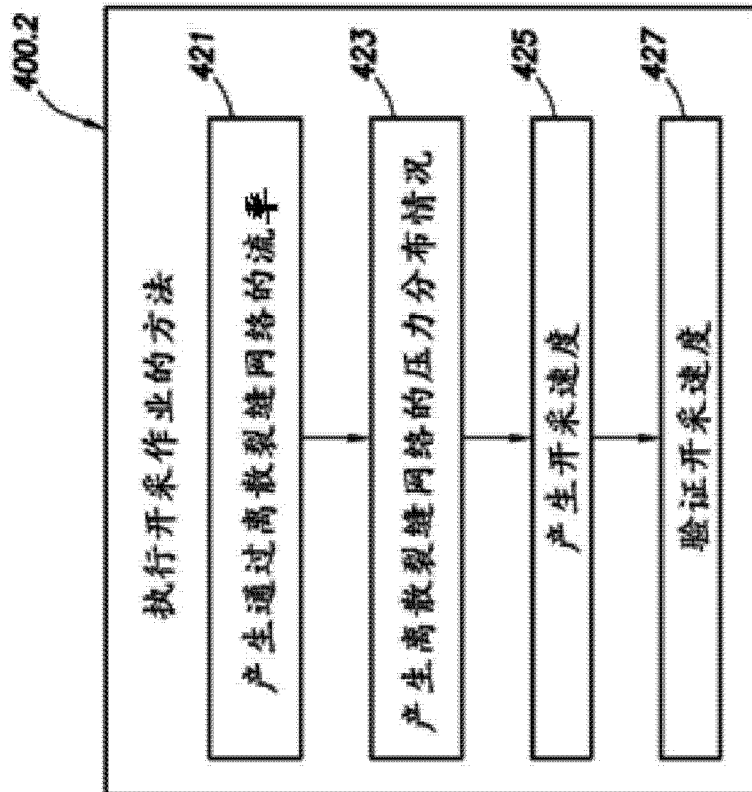


图 4.2

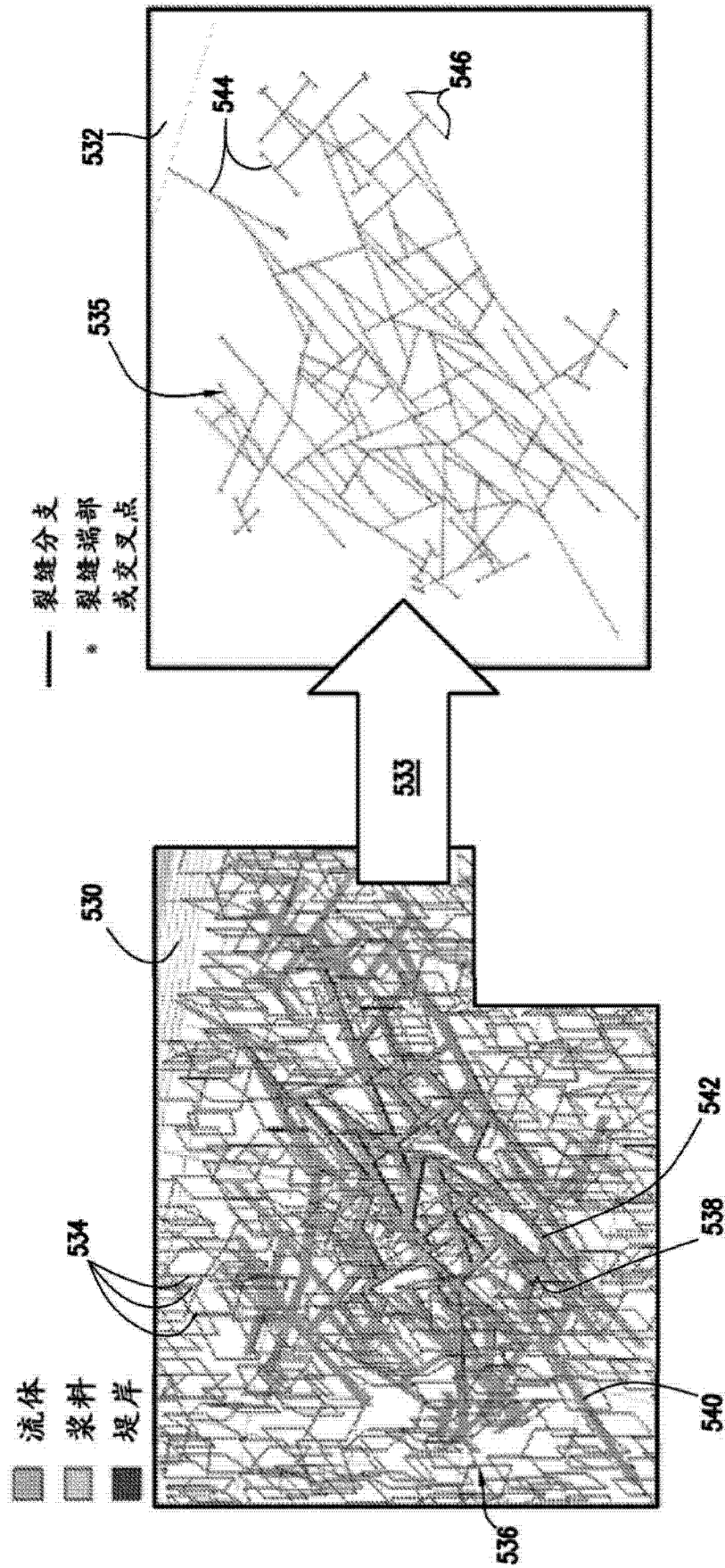


图 5

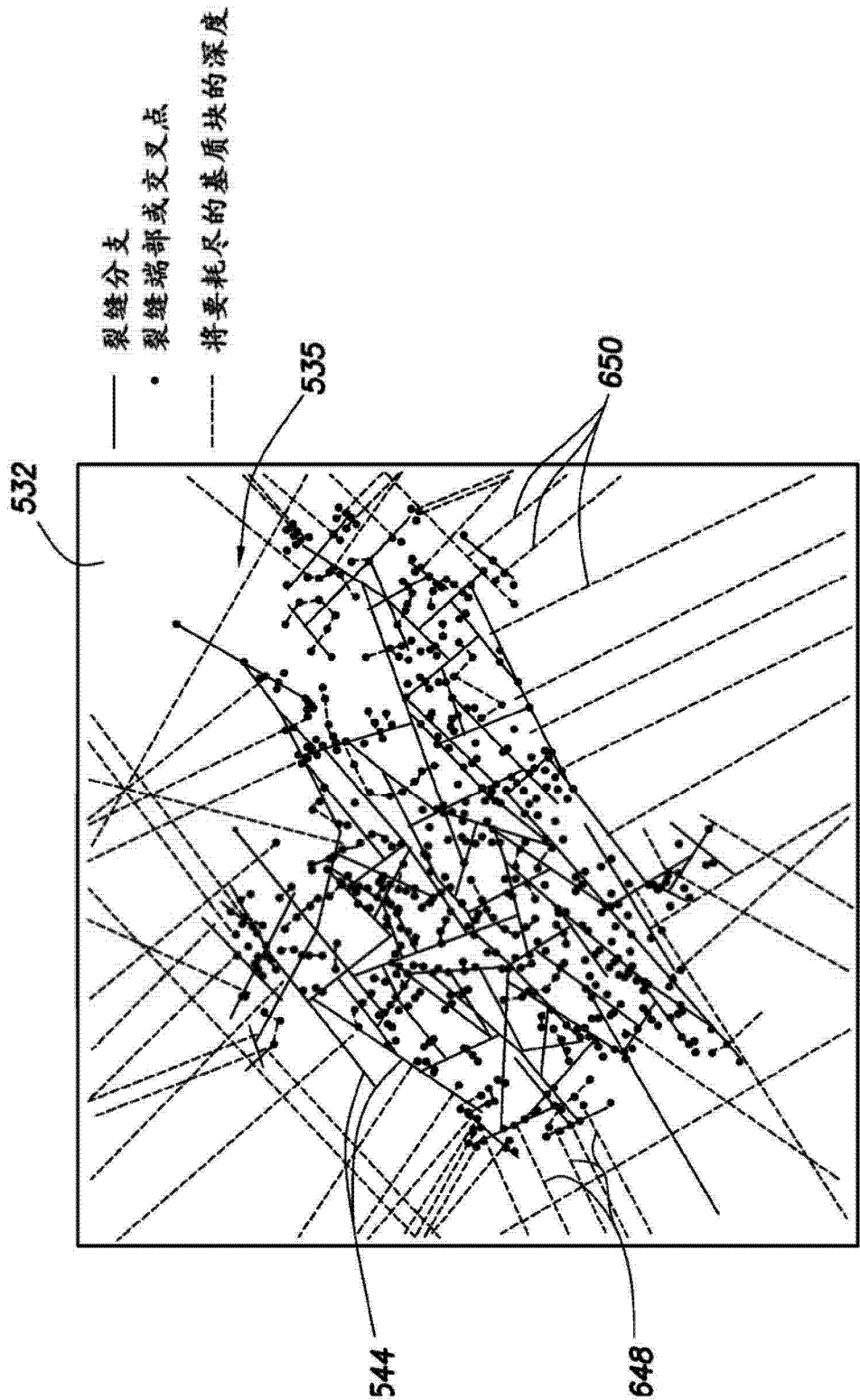


图 6

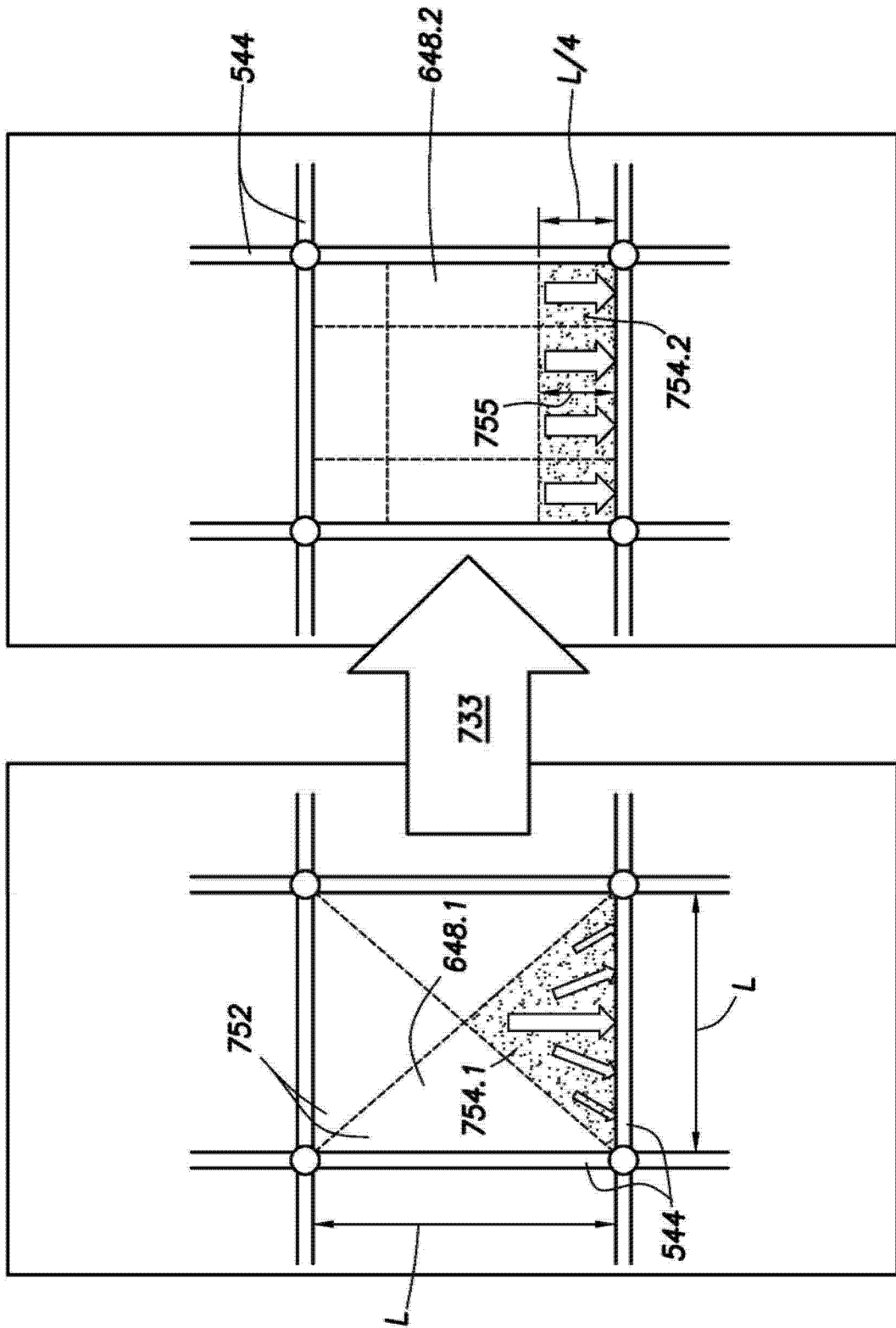


图 7

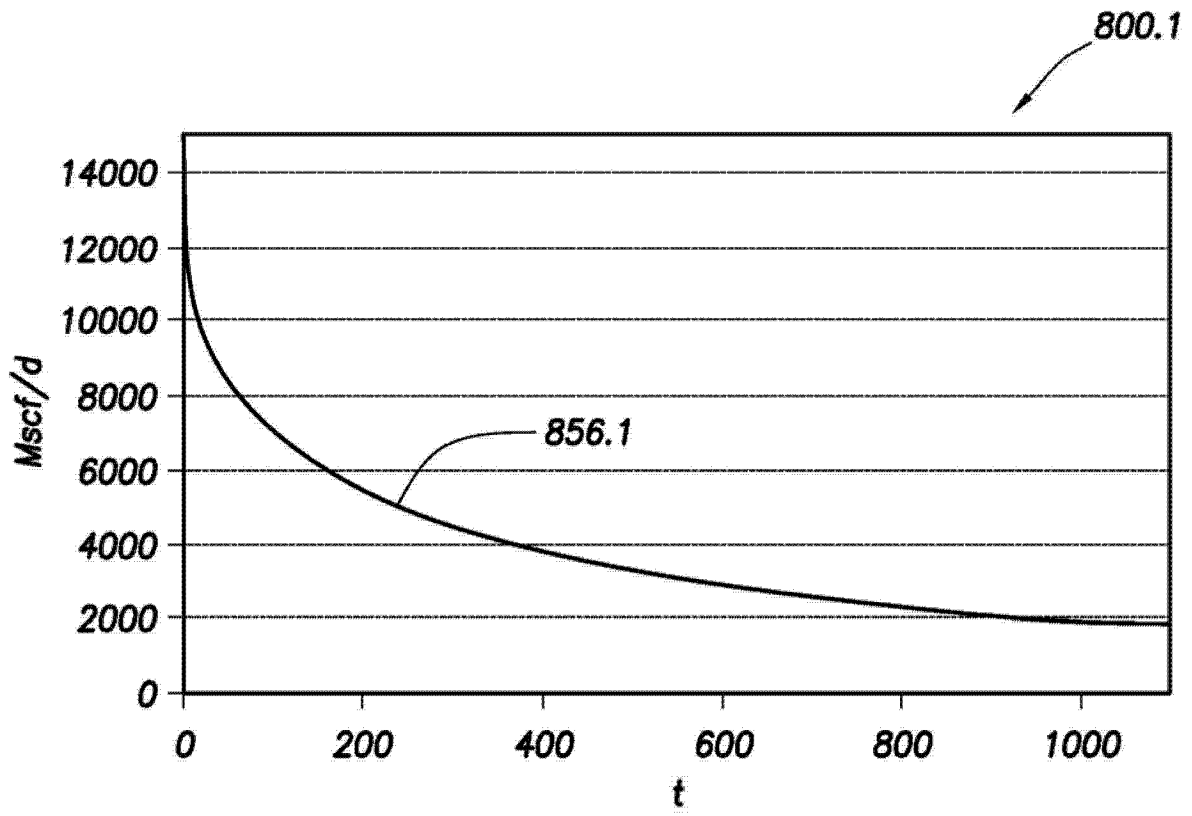


图 8.1

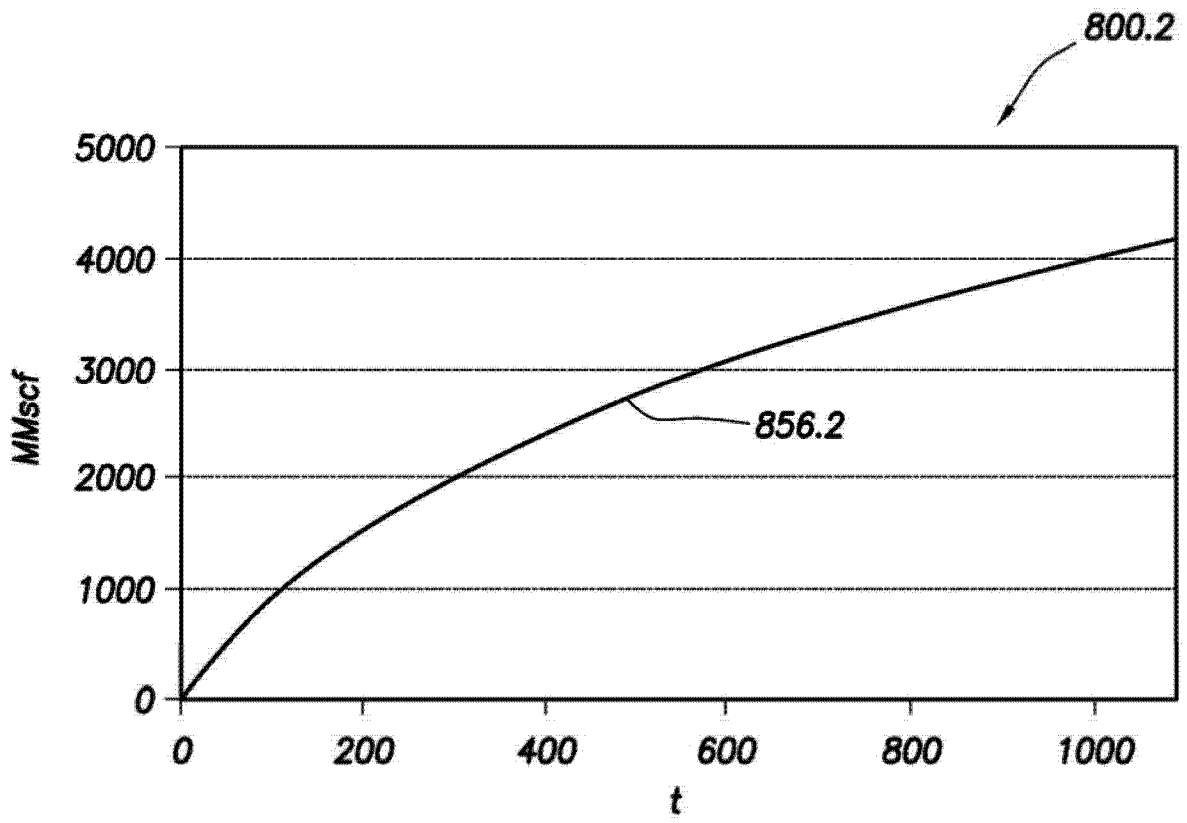


图 8.2

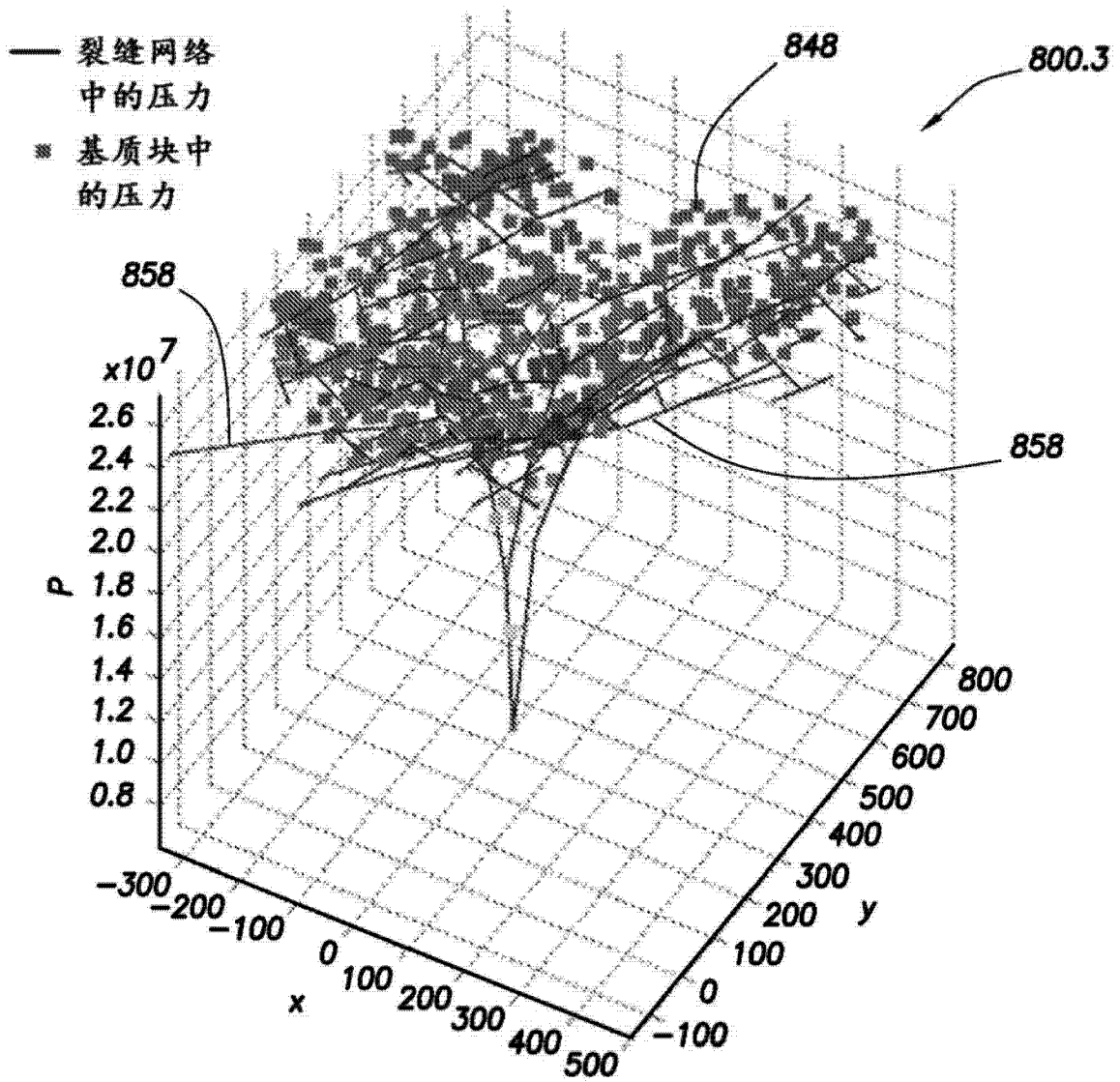


图 8.3

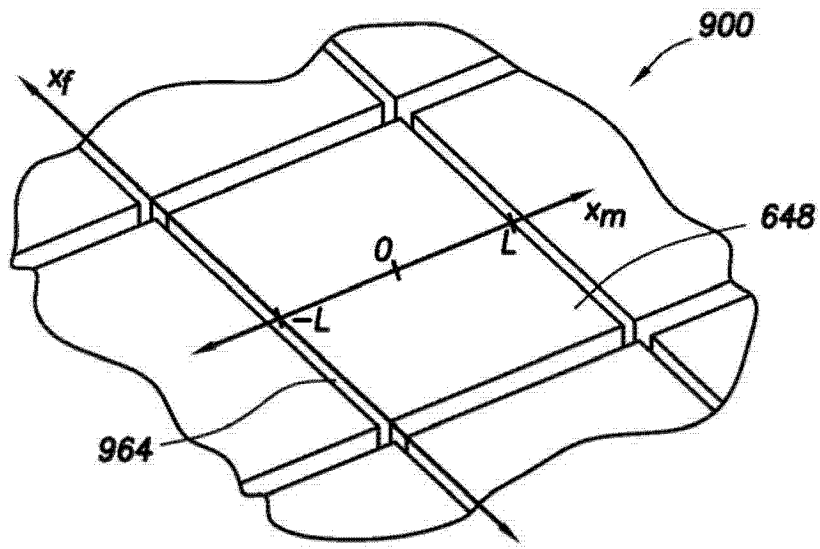


图 9

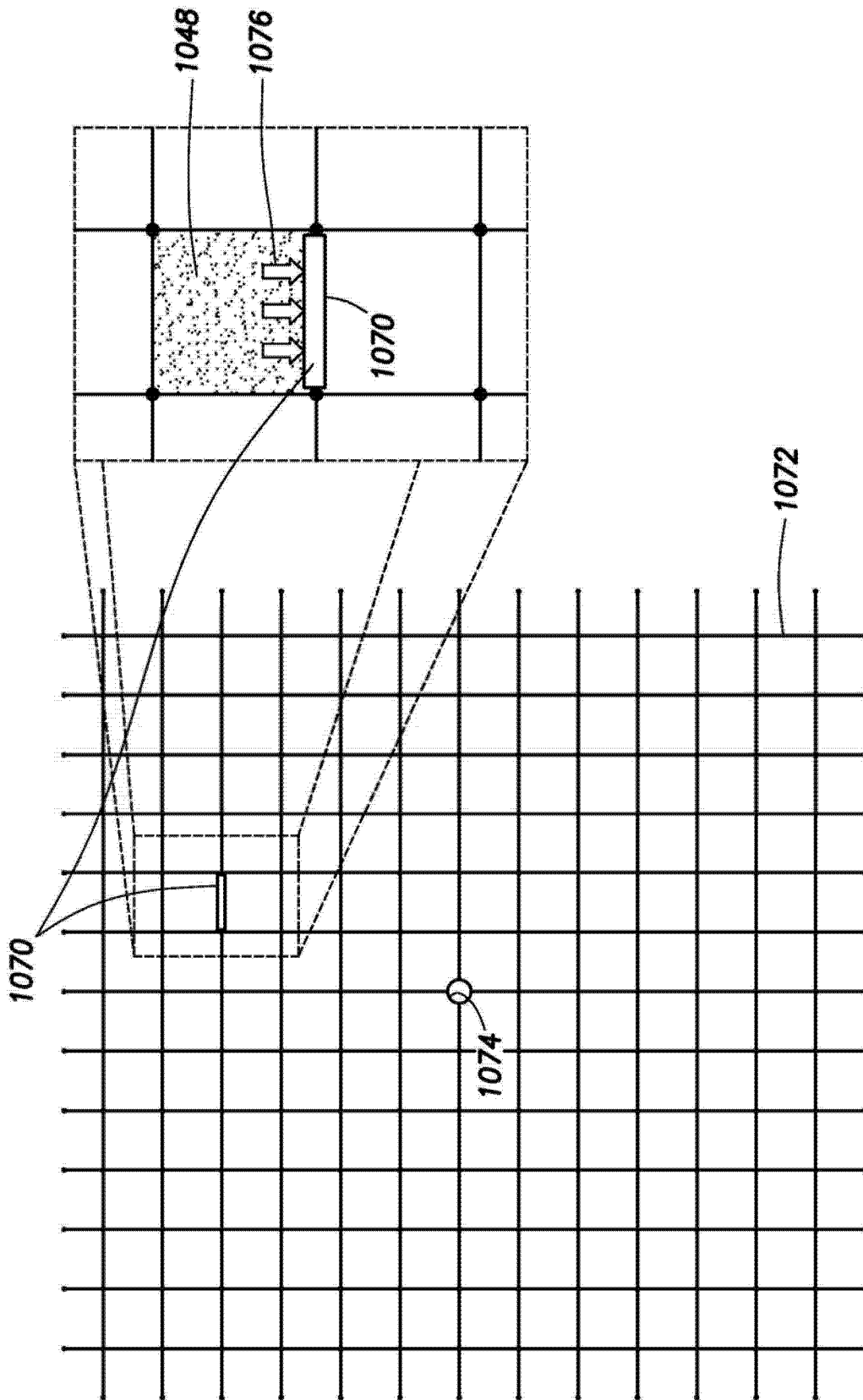


图 10

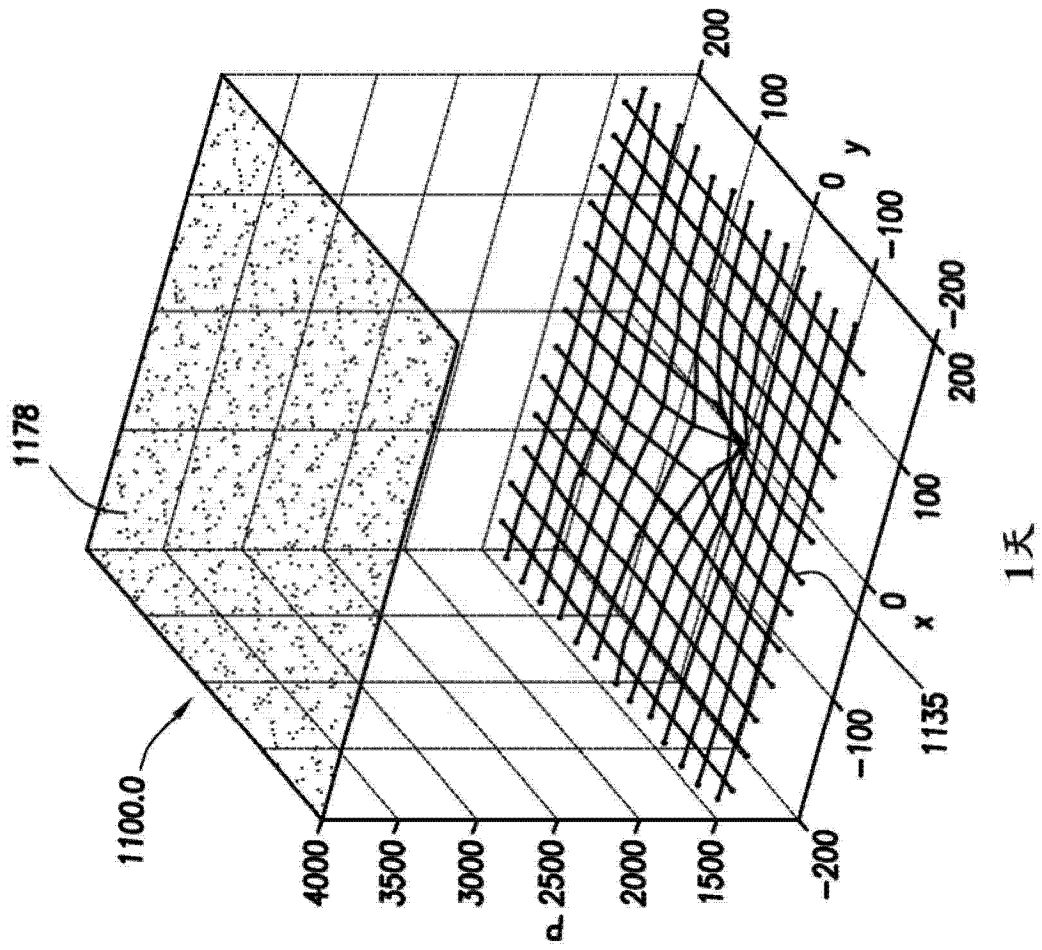


图 11.1

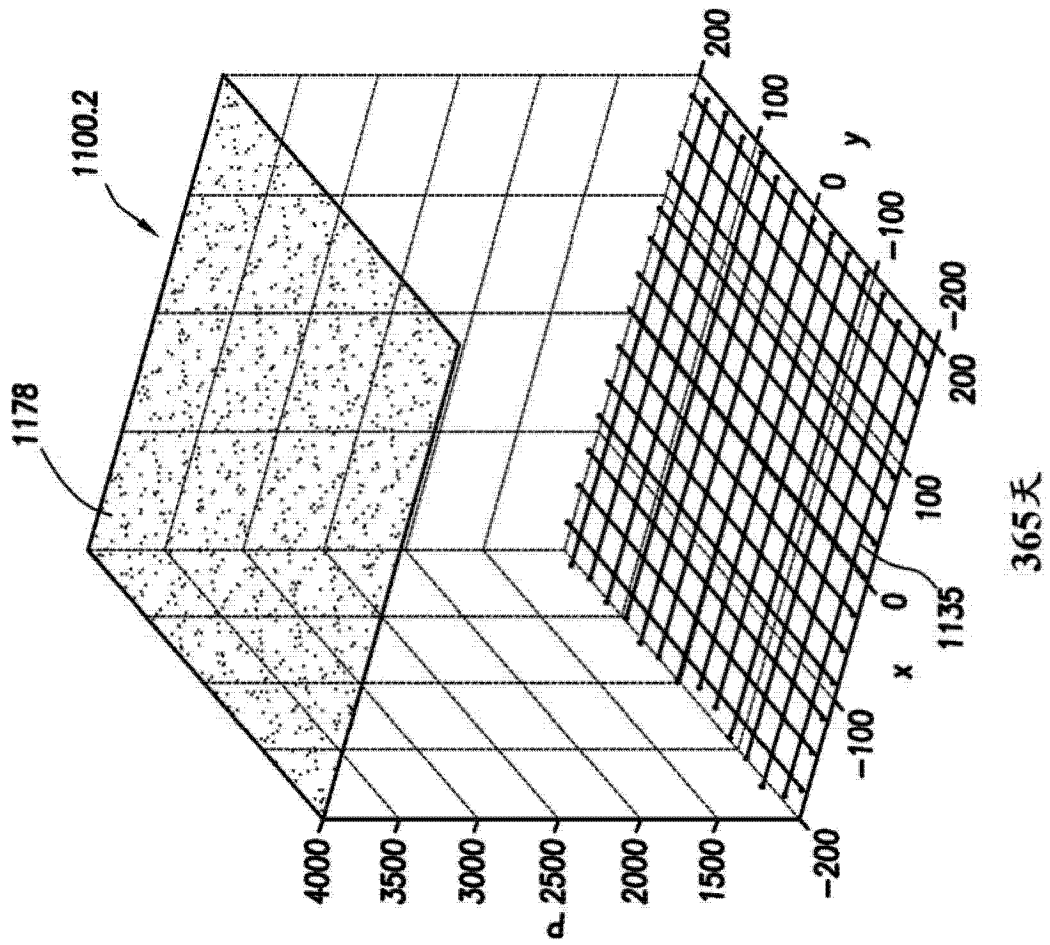


图 11.2

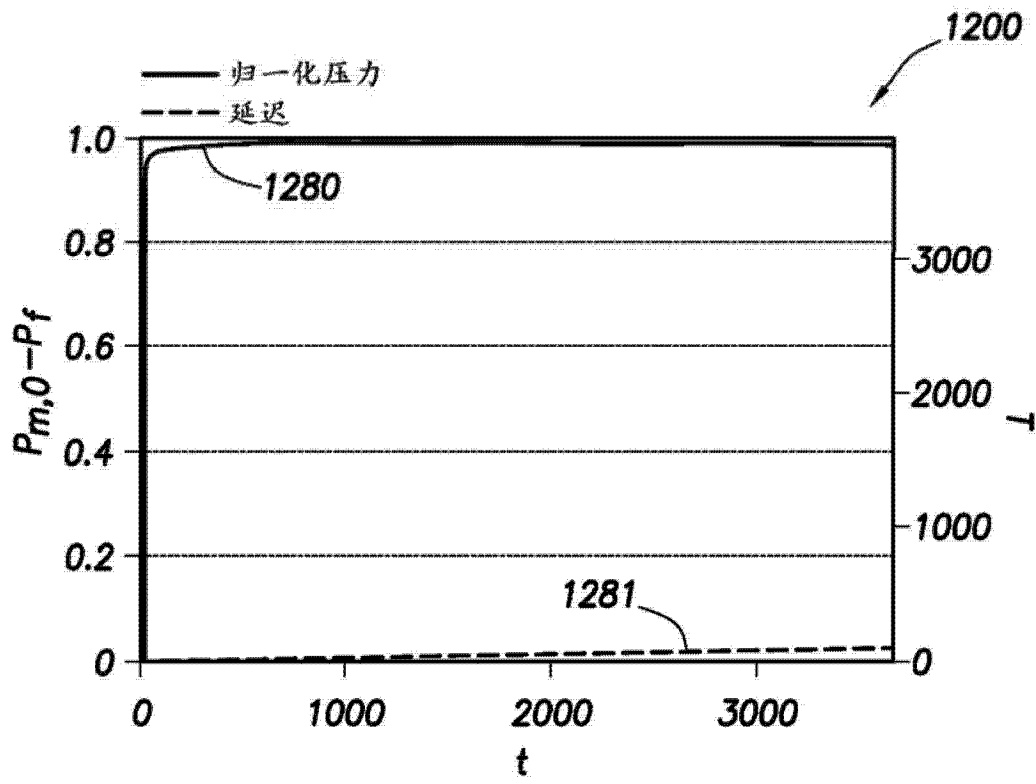


图 12

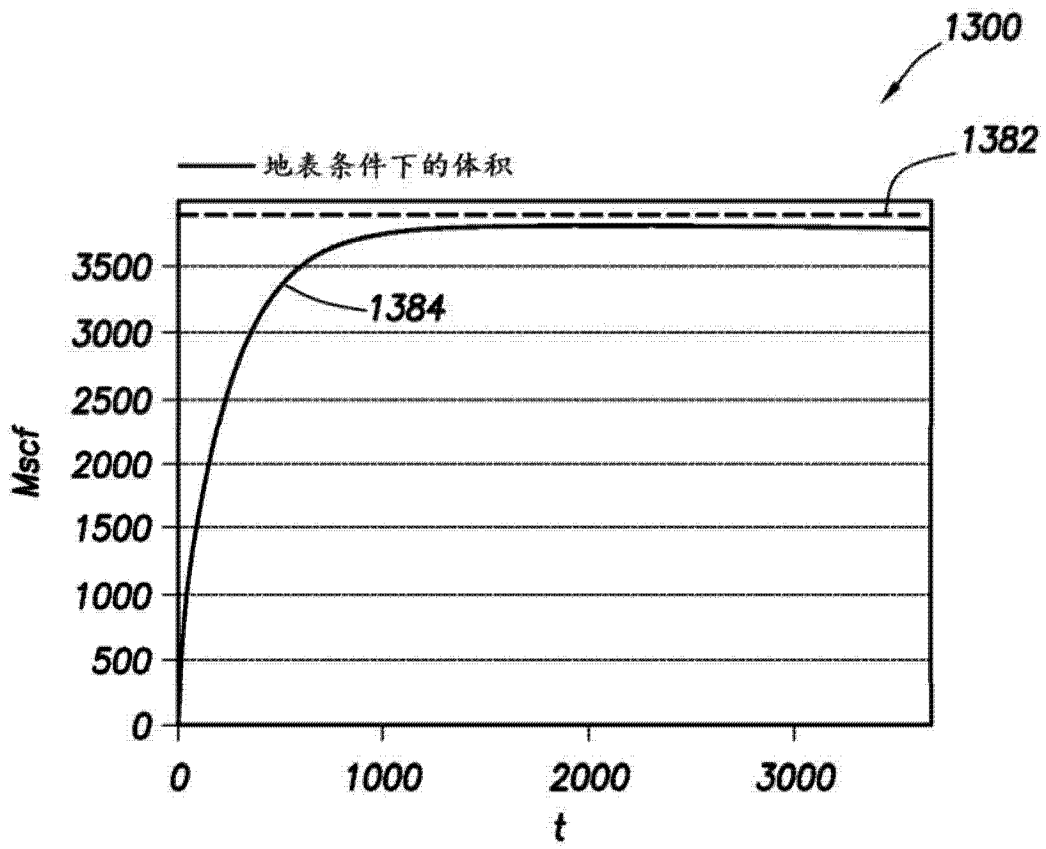


图 13

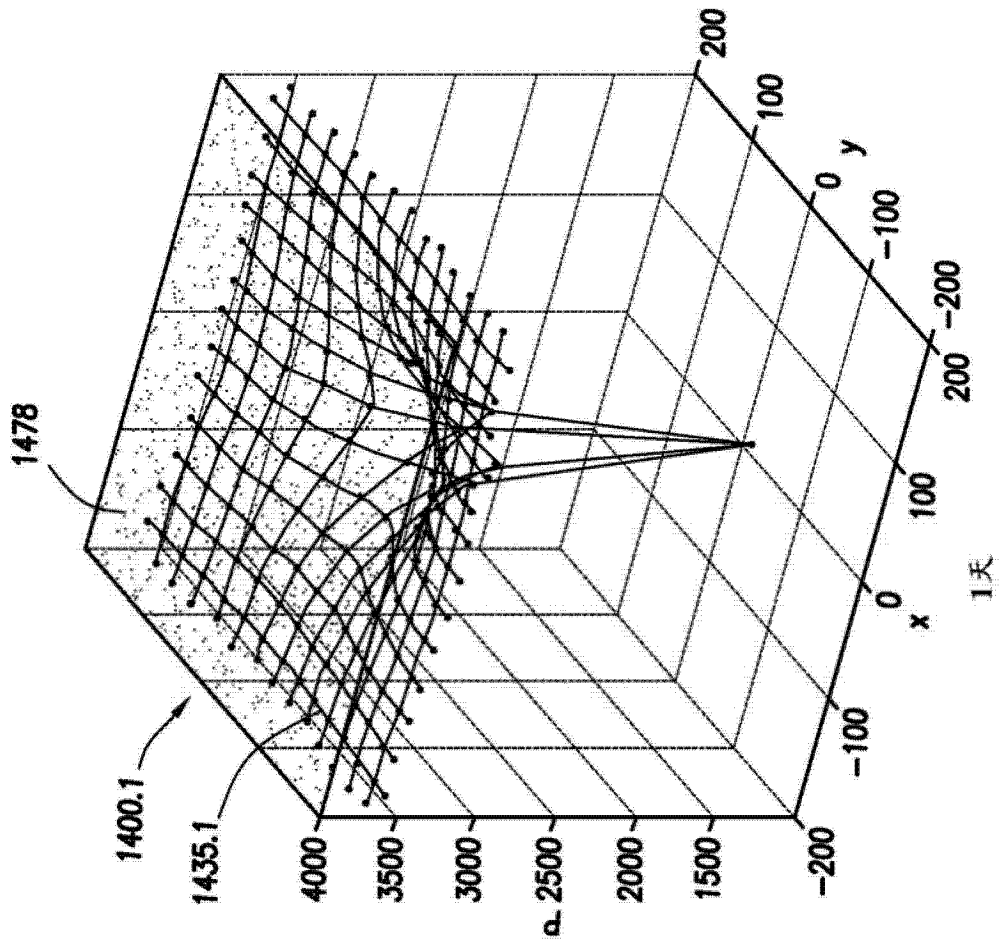


图 14.1

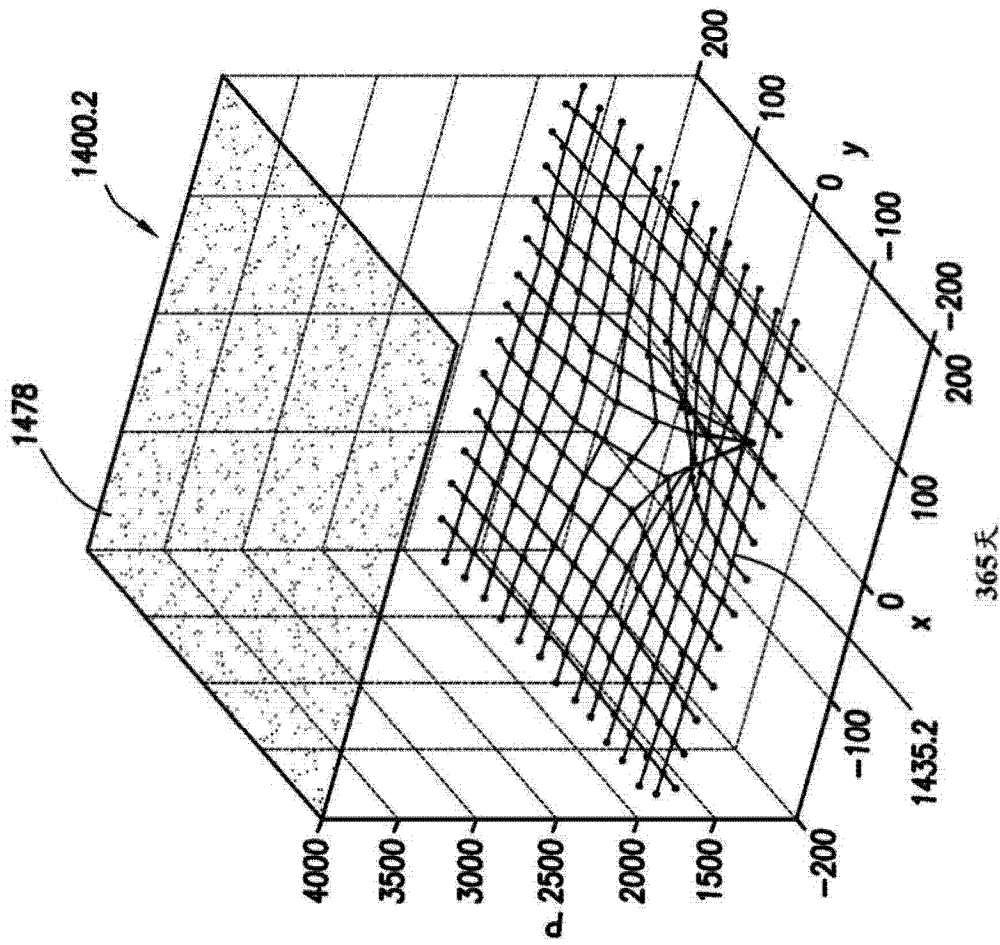


图 14.2

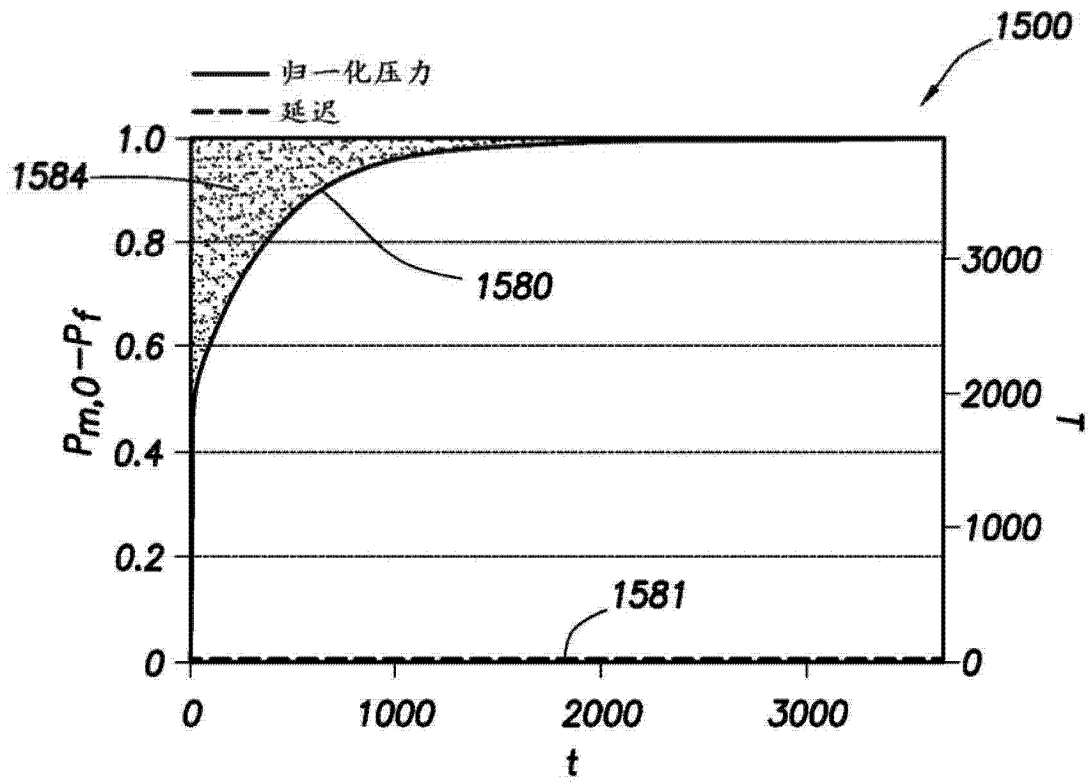


图 15

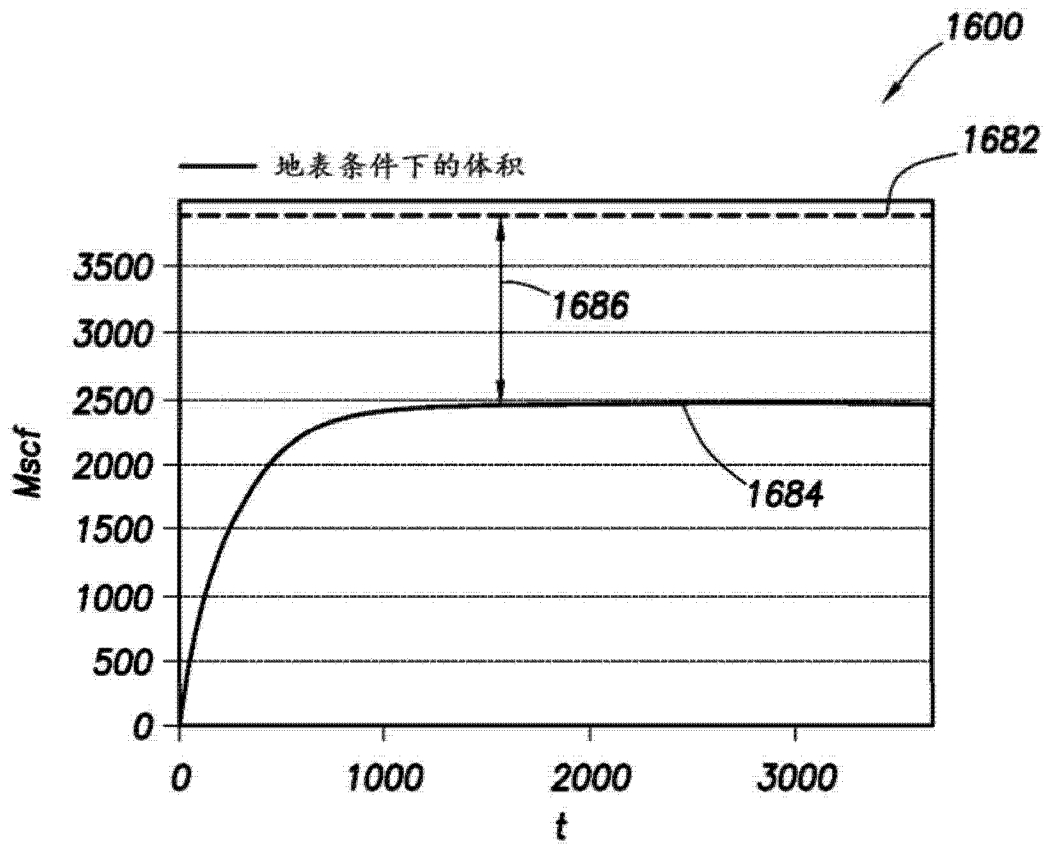


图 16

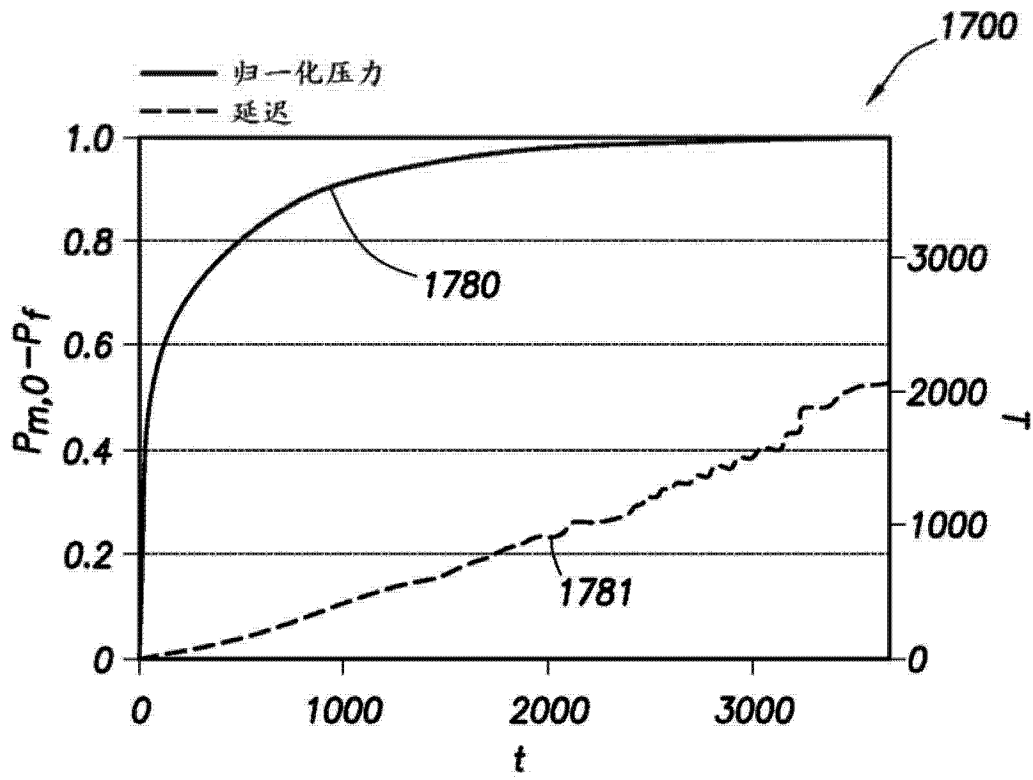


图 17

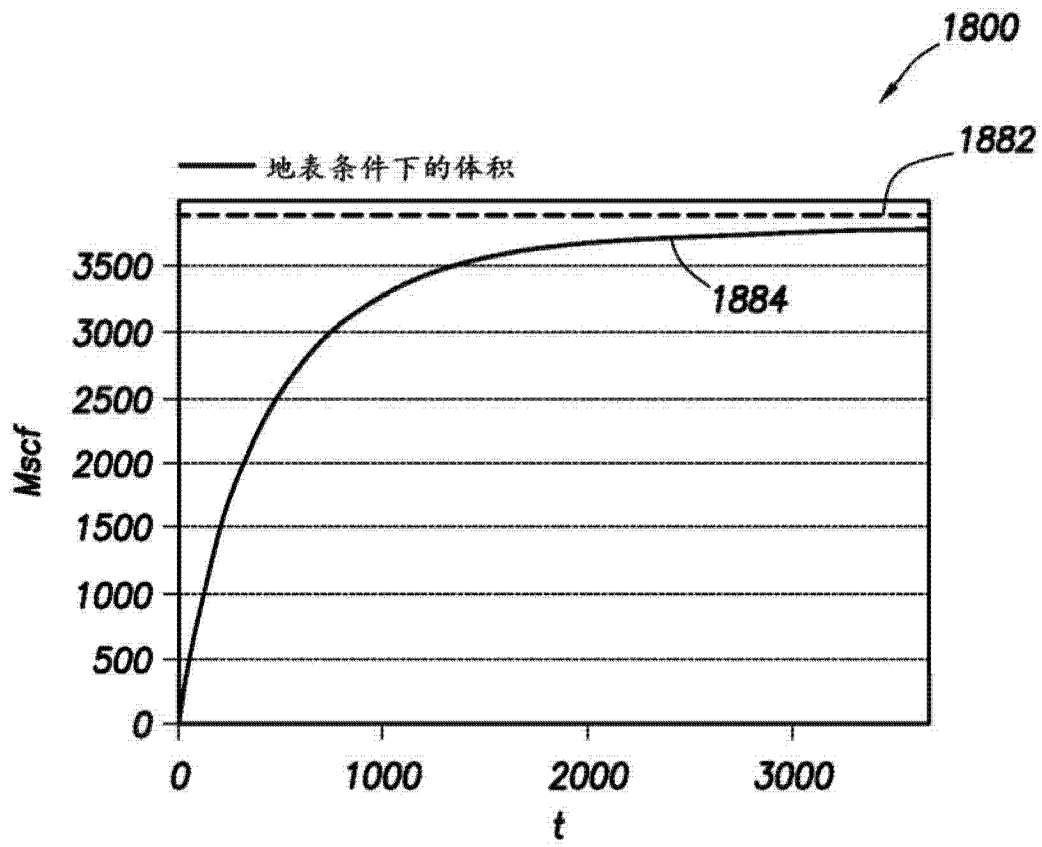


图 18

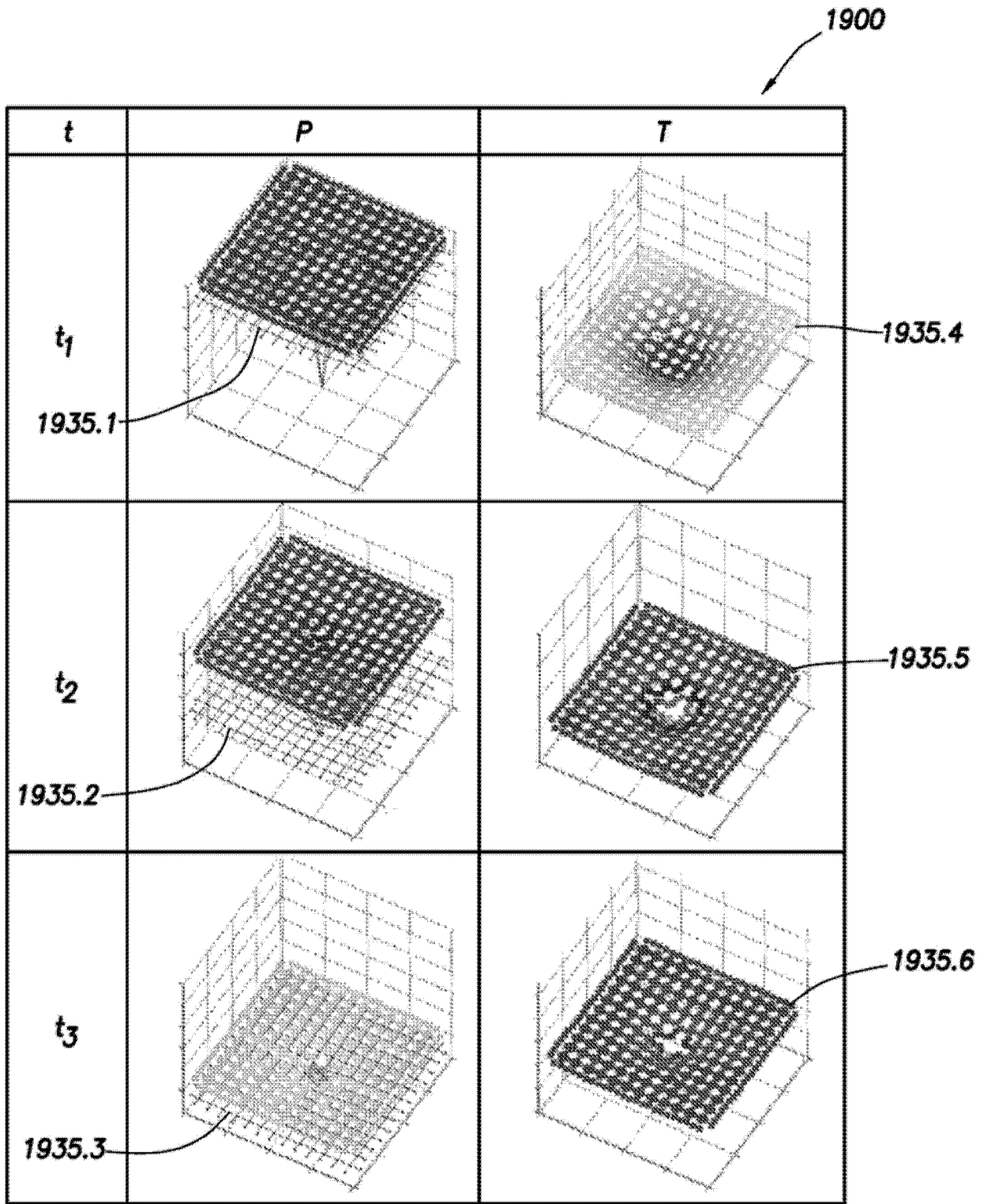


图 19

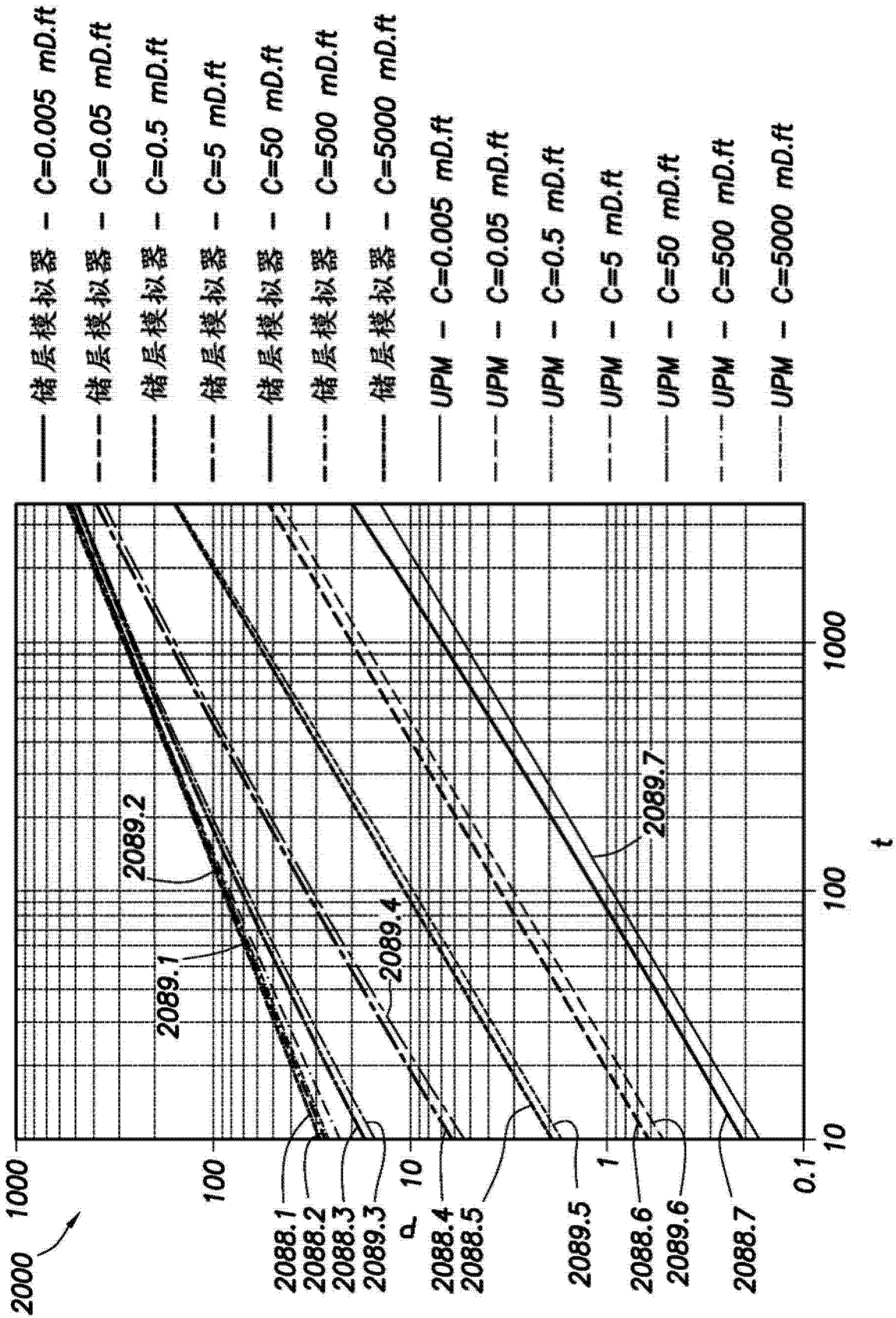


图 20

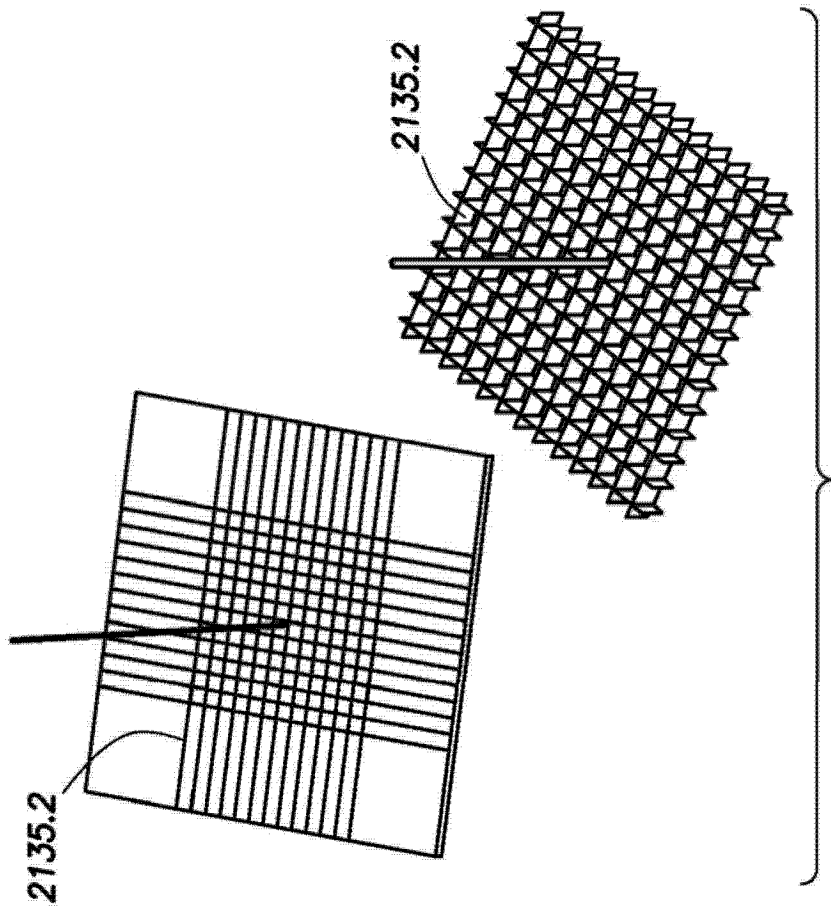


图 21.1

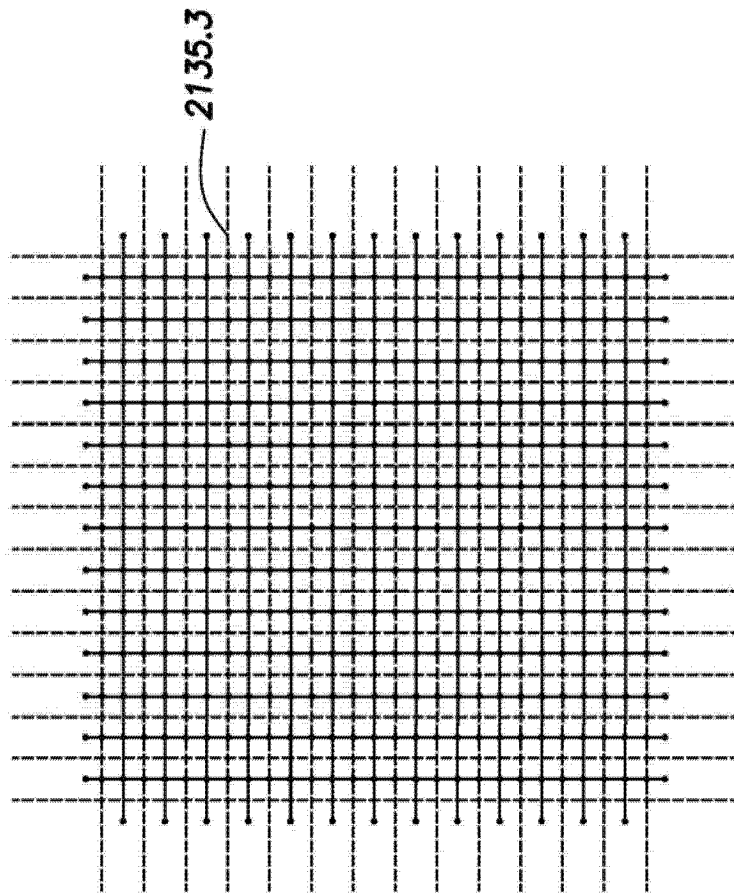


图 21.2

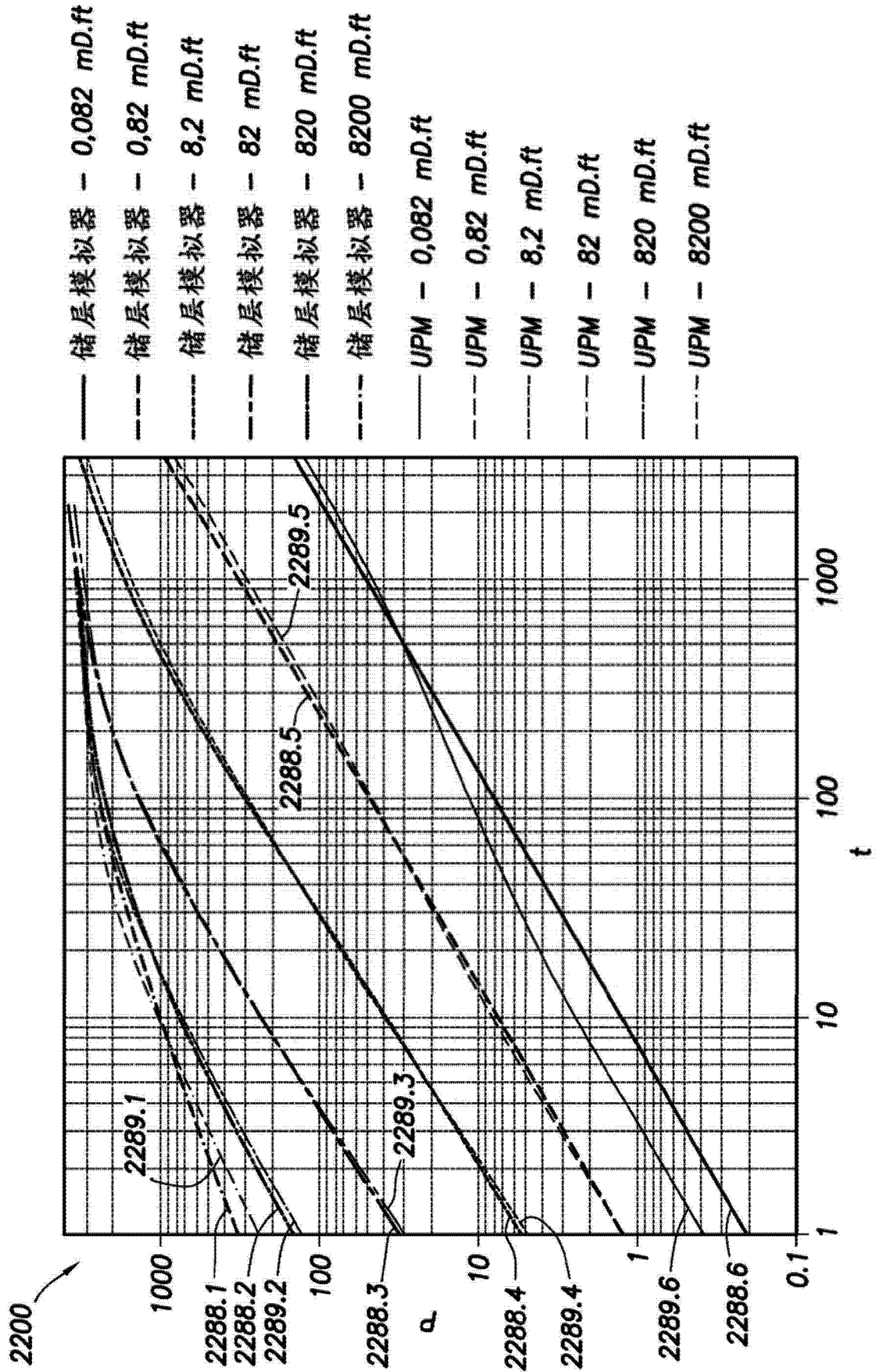


图 22

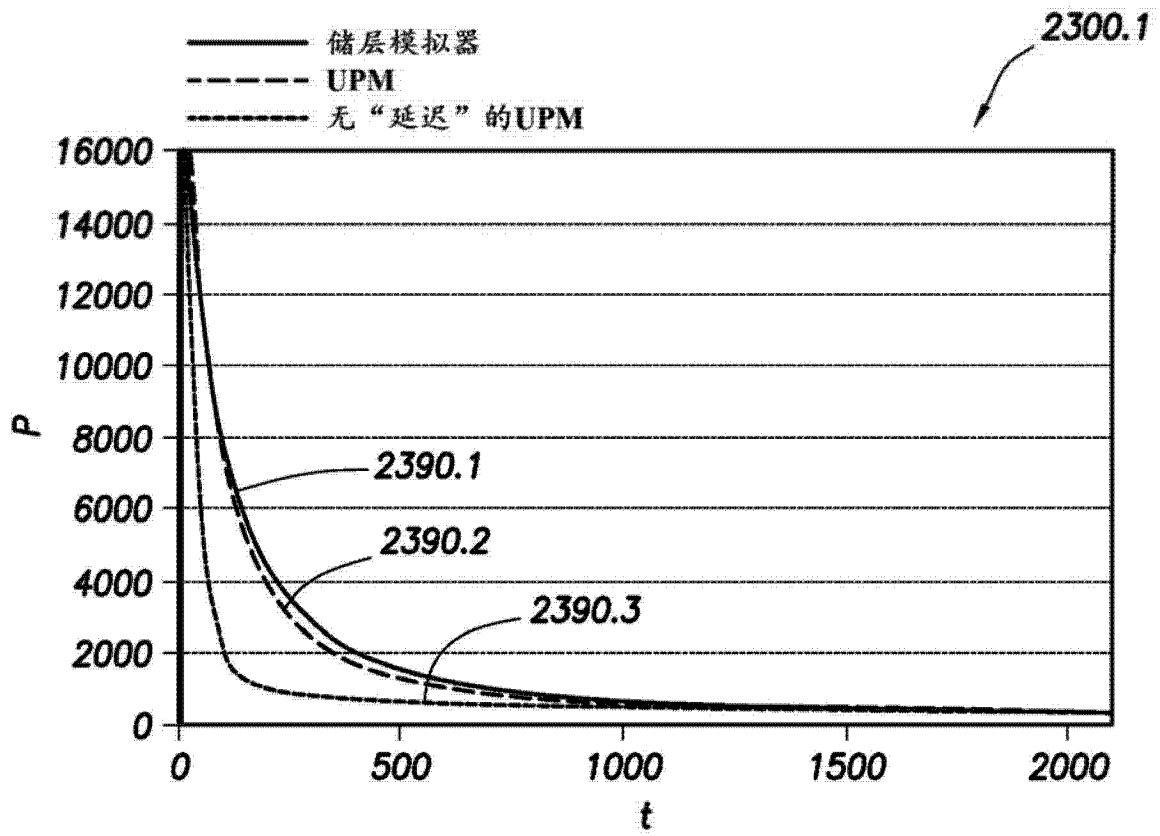


图 23.1

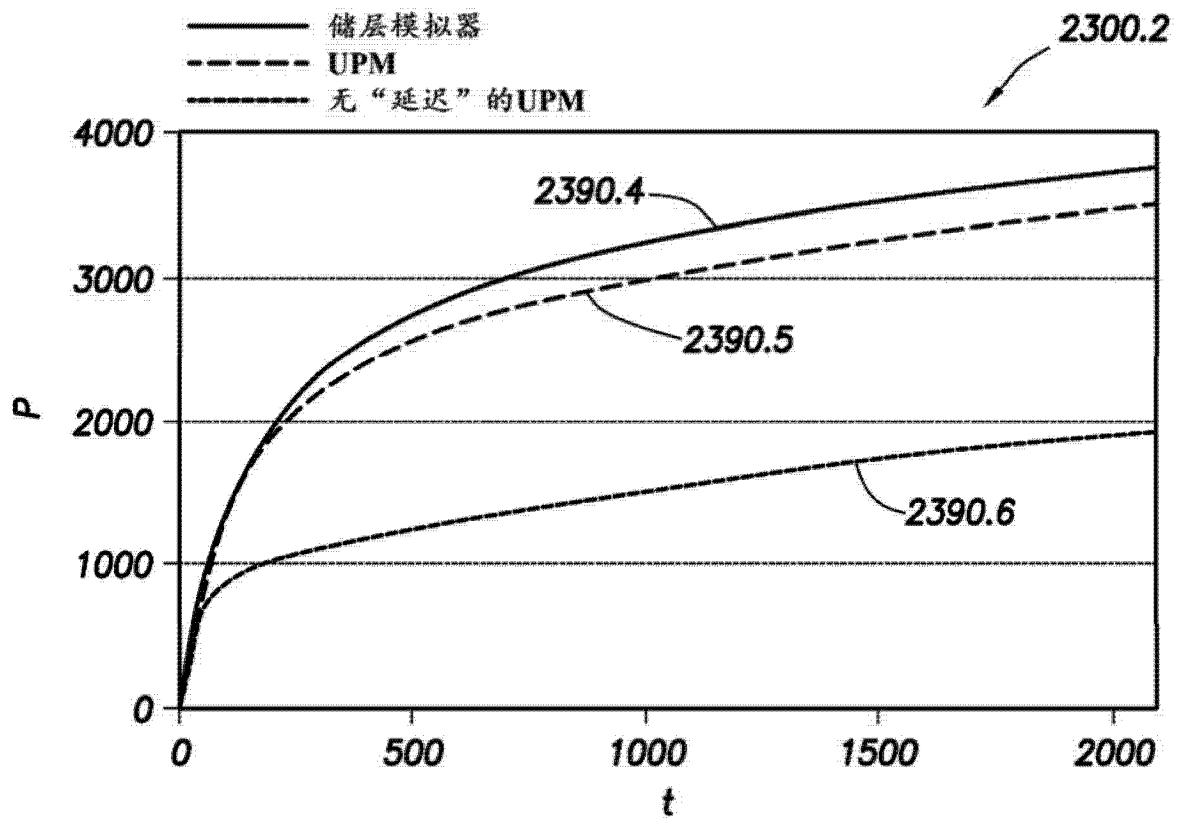


图 23.2