



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 104755699 A

(43) 申请公布日 2015. 07. 01

(21) 申请号 201380051349. 1

(51) Int. Cl.

(22) 申请日 2013. 08. 13

*E21B 43/26*(2006. 01)

*G01V 1/40*(2006. 01)

(30) 优先权数据

61/682, 618 2012. 08. 13 US

(85) PCT国际申请进入国家阶段日

2015. 03. 31

(86) PCT国际申请的申请数据

PCT/US2013/054640 2013. 08. 13

(87) PCT国际申请的公布数据

W02014/028432 EN 2014. 02. 20

(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 B·勒康皮 R·C·A·普里乌尔

S·阿巴斯

(74) 专利代理机构 永新专利商标代理有限公司

72002

代理人 周家新 蔡洪贵

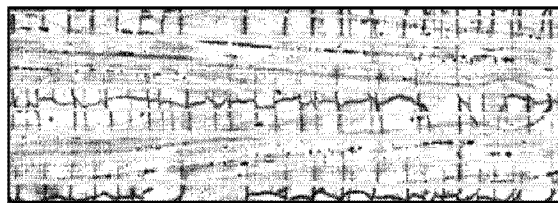
权利要求书1页 说明书12页 附图7页

(54) 发明名称

水平井中的横向和轴向水力裂缝之间的竞争

(57) 摘要

用于在环绕井眼的地下地层中形成横向裂缝的设备和方法包括:沿着环绕井眼的地层的长度测量特性,形成地层的应力分布,使用应力分布确定要被移除的地层区域,采用井眼中的装置移除该区域,并且导入流体进入井眼,其中,相比于该区域未被移除的情况,更可能形成横向裂缝。某些实施例受益于计算从该区域开始的裂缝的初始形成和扩散所需要的能量,优化流体导入以使所需的能量最小化,并且优化该区域的几何特征。



1. 一种用于在环绕井眼的地下地层中形成横向裂缝的方法,包括:  
测量环绕井眼的地层的特性;  
形成地层的应力分布;  
使用应力分布确定地层要被移除的区域;  
采用井眼中的装置移除该区域;以及  
导入流体进入井眼中,其中,相比于该区域未被移除的情况,更可能形成横向裂缝。
2. 权利要求 1 的方法,其中,该确定包括计算从该区域开始生成并且扩散裂缝所需的能量。
3. 权利要求 2 的方法,进一步包括优化流体导入,以使所需的能量最小化。
4. 权利要求 3 的方法,进一步包括优化该区域的几何特征。
5. 权利要求 1 的方法,进一步包括选取该区域的长度、该区域的宽度、该区域的角度或它们的组合。
6. 权利要求 5 的方法,进一步包括基于井眼角度选取该区域的角度。
7. 权利要求 5 的方法,其中,使用井眼的半径选取该长度。
8. 权利要求 1 的方法,其中,该区域为径向硬币形缺口或者射孔孔道或它们的组合。
9. 权利要求 1 的方法,其中,导入流体选自由流体的粘度、压力、泵送注入速率或它们的组合构成的组。
10. 权利要求 1 的方法,其中,该确定包括使用井眼几何特征。
11. 权利要求 10 的方法,其中,该几何特征选自由半径、方向、方位、偏离量或它们的组合构成的组。
12. 权利要求 1 的方法,其中,该特性包括井眼的地质力学特性。
13. 权利要求 12 的方法,其中,该地质力学特性选自由弹性、杨氏和剪切模量、泊松比、断裂韧度、应力场、应力方向、应力状态、应力幅度、最小闭合应力、最大和垂直应力、孔隙压力或它们的组合构成的组。
14. 权利要求 1 的方法,其中,该装置为射孔装置。
15. 权利要求 14 的方法,其中,该装置选自由作业装置、射孔孔道工具、聚能工具、基于激光的工具、径向切口工具、喷射工具或它们的组合构成的组。

## 水平井中的横向和轴向水力裂缝之间的竞争

[0001] 优先权

[0002] 本申请要求 2012 年 8 月 13 日提交的美国临时专利申请 61/682, 618 的优先权。该申请通过引用结合于此。

### 技术领域

[0003] 这里描述的方法和设备涉及将裂缝引入地下地层并且提高横向裂缝较多而轴向裂缝较少形成的可能性。

### 背景技术

[0004] 非传统储层中的大多数水平井沿着最小应力的方向钻取。因此, 优选的远场裂缝方位有利于相对于井眼成横向关系的水力裂缝。然而, 靠近井眼的应力集中有时有利于在由井轴线限定的平面上生成裂缝。从而, 横向和轴向水力裂缝在一些情况下既可以生成, 也可以使得井眼附近具有明显的弯折。在靠近井眼的区域中横向和轴向裂缝的同时存在增大了所生成的裂缝内的流动路径的弯折, 从而显著地妨碍支撑剂的放置。

[0005] 非传统页岩储层中的大多数井优选地沿着最小水平应力方向水平地钻探以在井增产之后获取多条横向水力裂缝。所有的井的圆筒状的特征引发具有取决于井眼流体压力的径向和切向分量 (与独立于井眼流体压力的轴向应力分量不同) 的弹性应力集中。因此, 井眼压力的升高最终将产生能够克服由井轴线限定的平面内的抗张强度和初始纵向裂缝 (在这里也被称作轴向裂缝) 的切向张应力。相反, 横向裂缝的产生需要生成来自于热弹性干扰或者对先前存在的天然缺陷 (即, 断裂) 的增压、射孔、缺口或塞座的轴向张应力。实际上, 如对裸井孔、加装有套管的孔的现场观察以及实验室实验所报道的, 横向和轴向水力裂缝可以从水平井开始产生。当开始产生时, 轴向裂缝可以对其重新定向以在它们继续扩散的情况下变成与最小应力正交或者停止它们的扩散, 这取决于它们与横向裂缝的竞争。单独的轴向或者轴向和横向裂缝的存在可能引起较高的处理压力, 对支撑剂放置产生影响并且加大了脱砂的可能性。由此对于水平井增产应用来说感兴趣的是使轴向裂缝最小化。

[0006] 这个问题已经通过对水力压裂的岩石块进行的实验室实验和基于线性弹性强度标准或者线性弹性裂缝力学标准进行的裂缝初始压力的数字模拟进行了研究。每种扩散模式都进行了独立的研究, 但是从包括轴向和横向裂缝的井眼开始的水力裂缝的生成和扩散的耦合固-液建模还没有被文献所记载。

[0007] 对裸眼水平井中的轴向和横向裂缝的存在进行的最引人注目的现场观察可在 Barnett 场的成像测井中示出。图 1 为沿着最小水平应力方向钻探的 Barnett 水平井的成像测井, 示出了纵向和横向方向中的裂缝 (深灰色)。两个纵向裂缝沿着井眼在井眼的顶部和底部彼此成 180 度地延伸。它们被一组平均间隔的具有相似长度的小横向裂缝所交叉。背景示出了页岩基床 (淡灰) 平行于井眼。在已知具有低的水平应力差的场中沿着最小主应力方向钻探水平井。轴向裂缝被解释为由钻井泥浆压力变化引发的典型钻井诱发裂缝, 而横向裂缝被解释为由于钻井泥浆和地层之间的温度差产生的冷却效应所引起的热力诱

发裂缝。该实例突显了以下事实：在低水平应力差环境下，小的应力扰动能够产生从可用作未来水力裂缝的起源断裂的裸眼孔开始产生的轴向和横向裂缝。对于水力压裂考量来说，这种的成像测井观测的一个重要的遗漏参数为这些裂缝偏离井眼壁的深度。

[0008] 从历史上来说，研究者通过实验室实验使用处于多轴应力下的水泥块中的裸眼水平井观测水平应力各向异性的影响，其中，低的水平应力差多数都会引起如图 2 所示的横向和轴向裂缝，而高的水平应力差多数有利于横向裂缝。当对注入速率和流体粘度的乘积 - 在较高的注入速率和粘度下的影响进行研究时，前面的观测被修正，所示的裂缝趋向于沿着井眼而不受水平应力差影响地产生。图 2 为在低应力各向异性的情况下从水平井眼开始的纵向和横向裂缝的示意图。美国专利 7,828,063 提供了某些附加细节并且通过引用被结合于此。

[0009] 对于具有射孔的加装有套管的水平井眼来说，已经认识到，裂缝在射孔基部可作为“起动裂缝”生成，接着抵抗中间应力发展成有限长度的“主”纵向裂缝，最终变成与纵向裂缝（图 2）成直角生成的“次生”横向裂缝。同样也对井眼相对于主应力倾斜并且引发具有附加裂缝复杂性的两种类型的裂缝的情况进行了研究。实验研究表明，如果射孔间隔小于直径的四倍，那么从射孔产生的轴向裂缝可以被最小化。对于线性或螺旋射孔的替代方案来说，也可以通过注射工具生成横向缺口以便于横向裂缝的发展。可以使用射孔装置，例如市场有售的 Schlumberger Technology Corporation of Sugar Land, Texas（德克萨斯州糖城的斯伦贝谢技术公司）的 ABRASIJET™ 装置生成缺口（也被叫作空腔）。射孔装置可包括操作装置，射孔孔道工具，聚能工具，基于激光的工具，径向切口工具，注射工具，或其组合。形成缺口的细节（即，移除地层的一个区域）和使用装置的细节在美国专利 7,497,259 中给出，其通过引用被结合于此。附加的细节在美国专利公开 2013-0002255 和美国专利申请 13/402,748 中给出。这些申请通过引用被结合于此。多射孔在美国临时专利申请 61/863,463 中进行了描述，其通过引用被结合于此。

[0010] 图 3 为从被射孔的加装有套管的水平井眼产生的裂缝的示意图并且对在多轴应力下在水泥块上进行的实验测试图进行了重画。这种典型的压裂过程在射孔的基部开始，接着具有主轴向裂缝和次生横向裂缝。

[0011] 对于与针对特殊的井方向和应力场获得的裂缝类型相关的大多数分析都是基于围绕井的应力干扰的计算和针对无缺陷裸眼井、针对射孔孔道效应以及针对材料各向异性的影响所调整的基于应力的拉伸断裂标准的使用。这种方法提供了裂缝初始压力的幅度水平和期望的最有可能的裂缝类型（轴向或横向）。然而，如果由于应力集中使得井眼壁上的一种或两种类型的裂缝都是有利的，那么这样的应力分析不会揭示出关于它们在地层中的标度的任何信息。更具体地，根据情况，尽管首先可产生纵向裂缝，但是与横向裂缝相比，其可能需要更高的能量使它们在地层中进一步扩散。需要包括缺口引入和流体引入的更有效地评估和实现压裂状态的方法。

#### 附图说明

[0012] 图 1 为具有横向和轴向裂缝的地层图像。

[0013] 图 2 为具有轴向和横向裂缝的水泥块的三维示意图。

[0014] 图 3 为从被射孔的加装有套管的水平井眼开始的裂缝的示意图。

[0015] 图 4 为纵向平面应变裂缝（左）以及建模为从井眼开始的径向裂缝的横向裂缝的示意图。

[0016] 图 5 为具有在各种孔压力和应力场情况下的磨擦极限的应力曲线图。

[0017] 图 6A 和 6B 为对水平井的轴向和横向裂缝使用缓慢增压的井眼初始压力作为初始缺陷长度的函数的曲线图。图 6A 为使用 Barnett 地层的曲线图并且图 6B 为使用 Marcellus 地层的曲线图。

[0018] 图 7A 和 7B 为对水平井的轴向和横向裂缝使用缓慢增压的井眼初始压力作为初始缺陷长度的函数的曲线图。图 7A 为使用 Haynesville 地层的曲线图并且图 6B 为使用实例 4 的地层的曲线图。

[0019] 图 8 为一个实施例的井眼压力作为水力裂缝长度的函数的曲线图。

[0020] 图 9 为另一个实施例的井眼压力作为水力裂缝长度的函数的曲线图。

[0021] 图 10 为井眼压力作为水力裂缝长度的函数的曲线图。

[0022] 图 11 为井眼压力作为水力裂缝长度的函数的曲线图。

## 具体实施方式

### [0023] 综述

[0024] 这里的实施例涉及一种用于在环绕井眼的地下地层中形成横向裂缝的设备和方法,包括:沿着环绕井眼的地层的长度测量特性,形成地层的应力分布,使用应力分布识别要移除的地层区域,采用井眼中的装置移除该区域,以及引导流体进入井眼,其中,如果该区域被移除则更容易形成横向裂缝。某些实施例受益于计算从该区域开始的裂缝的初始形成和扩散所需要的能量,优化流体的引入以使所需的能量最小化,并且优化该区域的几何特征。

### [0025] 描述

[0026] 这里,我们提供一种方法以及控制仅仅产生横向水力裂缝或者同时产生横向和轴向水力裂缝的参数以及后一情况下的轴向裂缝的最大长度。在所有的情况下,轴向和横向裂缝之间的竞争主要由初始的缺陷长度和应力场决定:优选地具有更大的横向初始缺陷以便于生成横向裂缝。观察到关键性起源断裂长度或者使横向裂缝超越纵向裂缝的缺口小于在缓慢增压极限下的一个井眼半径。在真实注入的情况下,如果初始的缺陷长度有利于纵向裂缝,使横向裂缝变得明显占据优势的距离可变得比缓慢增压值大得多,尤其是对于大的无量纲粘度来说。较小的增压速率和较小的粘性流体最终使得横向裂缝的扩散与纵向裂缝相比变得更容易。在水平应力差为零的情况下,始终都可以具有两种类型的裂缝几何特征。

[0027] 我们通过对比水力裂缝在生成和扩散过程中所需的能量而对这两种类型的裂缝之间的竞争进行了研究。首先,我们研究了流体流动和裂缝力学不匹配时缓慢和快速增压的极限情况。接着,我们使用了水力裂缝从裸眼井生成和扩散的数字模型,该模型考虑了最新产生的断裂中的流体流、井眼应力集中以及注入系统压缩系数。

[0028] 在给定了要被移除的区域的几何特征、井眼几何特征、地质力学特性等等的情况下,可以使用不同的数字或分析方法(例如,有限元方法,边界元方法,有限差分方法,有限体积法或者这些方法的组合)计算出裂缝在指定的路径上扩散所需要的能量。

[0029] 使裂缝扩散所需要的能量被定义为输入到系统中用以在材料中产生新的表面所需的能量。这取决于材料特性、区域（井眼，被移除的空腔，扩散中的裂缝）的几何特征以及注入条件。为了获得通过水力压裂产生并且扩散裂缝所需的能量，需要求解与位于被移除的区域和产生的裂缝内的注入流体的流动相结合的介质的组合机械变形。

[0030] 系统输入的总能量等于流速乘以注入压力。根据在某些给定的注入条件下裂缝从具有移除空腔的井眼开始进行的生长的计算结果，能够获取能量输入与产生的裂缝几何特征之间关系的曲线图（例如，参见下面更详细描述图 7-9）。

[0031] 接下来可以执行和比较几种不同的空腔几何特征、注入参数和裂缝路径的计算。根据能量最小化的原则，需要较少输入能量的裂缝路径将会是实际中产生的路径。这系列的模拟由此使得人们可以选择要被移除的空腔的最佳几何特征以及注入参数，从而基于最小的能量输入需求而获得预定期望的裂缝路径。井眼几何特征包括可以用在计算中的半径、方位、方位角、偏差或者它们的组合。此外，某些实施例将对要被移除的区域的几何特征进行优化，所述几何特征包括区域长度、区域宽度、区域角度或者它们的组合。区域角度可基于井眼角度。在某些实施例中，该区域可以基于井眼半径定制。在某些实施例中，要被移除的区域为径向硬币形缺口或者射孔孔穴或它们的组合。某些实施例的计算结果可包括井眼的地质力学特性，例如弹性、杨氏及剪切模量、泊松比、断裂强度、应力场、应力方向、应力状态、应力大小、最小闭合应力、最大和垂直应力、孔隙压力或它们的组合。

[0032] 我们使用线性弹性裂缝力学来研究井眼壁上的初始缺陷的进一步的扩散。我们建立了一个在弹性介质中具有轴向或横向的预先存在的给定长度的断裂的水平裸眼井的模型。忽略了多孔弹性效应，这对于渗透性非常低的包含有非常规页岩的岩层来说是合理的。在我们的公式中没有明确考虑弹性各向异性。使用对应于与所关注的裂缝正交的应力的弹性模量足以考虑一阶的各向异性效应，因为我们研究的是在主应力平面内扩散的模式 I 的张拉裂缝。为了简化起见，我们还忽略了热弹性和射孔的存在。轴向裂缝被建模成 2D 平面应变裂缝，并且横向裂缝被建模为 2D 轴对称（即，径向）裂缝，二者都从井眼缓慢移动并且完全考虑了近井眼应力干扰（参见图 3）。

[0033] 尽管应力分析是必要的，但是并没有轻易地预测水力裂缝的产生和扩散。包括有应力分布的应力分析通常包括多种信息来表征地层应力。可使用来自地质力学模型 (MEM)，地质力学工程 and 数据分析，测井数据，或者包括微震测试的井眼测试，小型压裂观测，以及漏失试验结果的信息来得到应力分布。

[0034] 我们使用考虑到了弹性各向异性的数字模型来比较这两种类型的裂缝，包括它们在水力裂缝产生和扩散过程中所需的能量，其中，弹性各向异性与非常规页岩岩层是相关的。对于一定范围内的相关的地层特性（例如，弹性各向异性）、远场应力条件以及典型的非常规页岩储层的增产参数来说，研究发现轴向水力裂缝的产生和扩散的长度尺度比横向裂缝明显更高效。

[0035] 基于量纲分析和数字模拟，我们提供了一种从裸眼井开始的这两种类型的裂缝的发生与关键无量纲参数之间关系的图，关键的无量纲参数包括无量纲粘度、标准应力差。一种方法和关键参数（压裂流体粘度，流体压力，泵送注入速率，井眼半径，地层现场应力，地层弹性特性和断裂强度）控制仅仅产生横向水力裂缝还是同时产生横向和轴向水力裂缝以及后一情况下的轴向裂缝的最大长度。

[0036] 我们研究了与在弹性的不可渗透地层中钻探的井眼成横向关系的水力裂缝的产生和早期扩散。这种结构类似于水平井和水力裂缝垂直于井轴线的情况。假设为轴对称裂缝,在水力裂缝到达任何应力障碍之前的早期时间里假设有效,并且关注于裸眼井完井。除了弹性方程中的井眼效应,还考虑了在坍塌前的增压阶段中存储在井眼中的流体体积的释放效应。这种效应取决于注入系统的压缩系数(使井眼、管道等等中的流体的压缩系数集中)。该公式显然还考虑了弹性方程、最新产生的断裂中的流体流动(润滑理论)以及裂缝扩散条件之间的强耦合。对问题进行量纲分析,突出在产生和扩散中的不同机理的重要性。这种分析有助于量化在现场或实验室范围内相关的时间和长度尺度。此外,我们开发了一种用于解决该问题的完全耦合的隐式算法。使用位移不连续法对超奇异弹性边界方程进行离散化使其具有正确的包括有井眼效应的弹性核。使用简单一维有限体积法对流体流进行离散化。对于给定的裂缝增量,使用扩散条件求解对应的时间步长。对于给定的裂缝增量和试验时间步长,根据每个节点上的打开增量进行离散的方程(弹性和流体连续性)的非线性系统通过固定点迭代法解决。这些结果通过它们长时间趋向于无限介质中的轴对称水力裂缝的解进行收敛而被证实。下面对各种无量纲参数(井眼半径,粘度和初始裂纹长度)对坍塌压力、断裂扩散以及进入裂缝的有效流量的影响进行研究。

[0037] 与单一的张应力分析不同,这里描述的方法提供一种对仅横向水力裂缝的产生或者横向和轴向水力裂缝这两者的同时产生以及后一情况下的轴向裂缝的最大长度进行量化的途径。基于对一定范围内相关的地层特性和远场应力条件进行的量化分析和数字模拟,我们的结果显示在缓慢增压极限下使横向裂缝超越纵向裂缝的关键缺陷长度小于井眼半径。对于真实的注入条件来说,如果初始的缺陷长度有利于轴向裂缝,使得横向裂缝变得具有显著优势的距离可变得比其缓慢增压值大得多,尤其是对于大的无量纲粘度来说。较小的增压速率和较小粘度的流体最终使得横向裂缝与轴向裂缝相比更易于扩散。

[0038] 在考虑井眼增压以及在两种裂缝几何特征上由牛顿流体注入所驱动的裂缝扩散的完全作用之前,我们首先研究了沿着裂缝的流体压力等于井眼压力的缓慢增压情况。为了构建讨论,我们选取了四个代表某些非常规储层的不同的初始应力场:三个具有大小不同的水平应力差的普通应力状态以及一个走滑应力状态(参见图4的表1)。如已经描述的,我们关注于沿着最小水平应力的方向钻探的水平井的情况。对于这种普通应力状态的情况,纵向和横向裂缝都是垂直的(彼此成九十度)。对于走滑应力状态,尽管横向裂缝仍然保持垂直,但是纵向裂缝为水平的。

[0039]

	状态	$\frac{\sigma_v}{\sigma_v}$ (-)	$\frac{\sigma_H}{\sigma_v}$ (-)	$\frac{\sigma_h}{\sigma_v}$ (-)	$\frac{p_p}{\sigma_v}$ (-)	$\sigma_v$ (psi/ft)	$z$ (ft)	关系
实例 1 "Barnett"	普通	<b>0.6</b>	0.6	1	<b>0.45</b>	<b>1.13</b>	<b>5,000</b>	$\sigma_h = \sigma_H < \sigma_v$
实例 2 "Marcellus"	普通	<b>0.75</b>	0.875	0.857	<b>0.6</b>	<b>1.13</b>	<b>6,000</b>	$\sigma_h < \sigma_H < \sigma_v$
实例 3 "Haynesville"	普通/ 走滑	<b>0.9</b>	1	0.9	<b>0.8</b>	<b>1.13</b>	<b>10,000</b>	$\sigma_h < \sigma_H = \sigma_v$
实例 4 "未公开"	走滑	<b>0.9</b>	1.5	0.6	<b>0.45</b>	<b>1.13</b>	<b>5,000</b>	$\sigma_h < \sigma_v < \sigma_H$
		<b>0.9</b>	1.5	0.6	<b>0.75</b>	<b>1.13</b>	<b>5,000</b>	$\sigma_h < \sigma_v < \sigma_H$

[0040] 表 1, 使用的应力场情况; 黑体表示的数值是大致基于真实的非常规页岩区块的例子而选取的。

[0041] 图 5 为对于使用的孔隙压力和应力场情形具有磨擦极限的应力多边形。灰色块给出少数美国页岩气区块中已知的从较轻灰色到较重灰色的应力场范围: Fayetteville, Barnett, Marcellus 和 Haynesville。圆点对应于实例 1 到 4(参见表 1)。

[0042] 我们使用线性弹性裂缝力学分析来对比从井眼开始的纵向和横向裂缝的产生。在后面, 没有明确地考虑流体注入、而是研究了从井眼缓慢移动的具有给定大小  $l_0$  的缺陷在井眼压力下被充分加压或者仅被储层压力加压的极限情况。裂缝内的压力等于井眼压力的情况对应于缓慢井眼增压(或者, 相当于注入非粘滞性流体), 而裂缝仅被储层流体加压的情况对应于快速增压, 其中, 被注入的流体还没有完全渗透到裂缝内。

[0043] 对于纵向和横向裂缝来说, 从井眼壁缓慢移动的大小为  $l_0$  的缺陷的模式 I 应力强度因子如下给出:

$$[0044] \quad \frac{K_I}{\sqrt{\pi l}} = \frac{2}{\pi} \int_0^{l_0} p(x+a) f\left(\frac{x}{l_0}, \frac{l_0}{a}\right) \frac{dx}{l_0 \sqrt{1-(x/l_0)^2}} \quad (1)$$

[0045] 其中,  $p$  表示作用在断裂上的净压力,  $a$  为井眼半径并且  $f(x/l_0, l_0/a)$  为考虑了井眼的压力的影响函数:

$$[0046] \quad f(x/l_0, l_0/a) = \left(\frac{x/l_0 + a/l_0}{1 + a/l_0}\right)^{d-1} \left(1 + 0.3 \left(1 - \frac{x}{l_0}\right) \left(\frac{1}{1 + l_0/a}\right)^4\right)$$

[0047] 其中, 对于平面应变结构(即, 纵向裂缝)来说,  $d = 1$ , 对于轴对称结构(即, 横向裂缝)来说,  $d = 2$ 。在本标记中,  $x$  坐标指的是沿着断裂的横坐标。净压力  $p$  为裂缝中的流体压力  $p_f$  与由于远场应力和井眼应力集中而产生的与裂缝平面正交的夹紧应力  $\sigma_0(x)$  之间的差值:

$$[0048] \quad p(x) = p_f(x) - \sigma_0(x)$$

[0049] 在与沿着最小应力的方向钻探的井成横向关系的横向裂缝的情况下, 夹紧应力等于井眼轴向应力并且如下给出:  $\sigma_a = \sigma_h - 2\nu(\sigma_v - \sigma_h) \cos \theta$ 。井眼压力不会影响到该轴向应力, 并且其方位角平均值等于最小应力  $\sigma_h$ 。因此, 对于一阶估计, 我们将与横向裂缝正交的夹紧应力取为与最小应力一致并且相等: 对横向裂缝的情况来说  $\sigma_0 = \sigma_h$ 。

[0050] 然而, 对于纵向裂缝来说, 井眼应力集中对优选的裂缝方位的法向应力具有一阶



影响。从弹性方程可知,在垂直于中间应力的方向上,夹紧应力等于环向应力  $\sigma_{\theta\theta}$  (参见图 3) :

$$[0051] \quad \sigma_{\theta\theta}(x) = -\frac{a^2}{x^2} p_b + \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} \left( 1 + \frac{a^2}{x^2} \right) - \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \left( 1 + 3 \frac{a^4}{x^4} \right)$$

[0052] 其中,  $\sigma_1$  和  $\sigma_2$  ( $\sigma_1 > \sigma_2$ ) 对应于作用在平面中的远场应力并且  $p_b$  表示井眼压力。对于法向应力状态和水平井的情况来说,  $\sigma_1$  等于覆岩应力  $\sigma_v$  (并且  $\sigma_2 = \sigma_H$ ), 而对于走滑应力状态来说,  $\sigma_1$  等于  $\sigma_H$  (并且  $\sigma_2 = \sigma_v$ )。值得注意的是, 对应的用于纵向裂缝的抗拉强度标准 (基于环向应力) 为快速增压的情况提供 Hubbert-Willis (H-W) 初始压力:  $3\sigma_2 - \sigma_1 + T - p_0$  以及为缓慢增压情况提供 Haimson-Fairhurst (H-F) 初始压力  $\frac{1}{2}(3\sigma_2 - \sigma_1 + T)$  (当忽略多孔弹性时)。

[0053] 对于缓慢增压来说, 流体压力在预先存在的缺陷中是一致的并且等于井眼压力  $p_f(x) = p_b$ , 而对于快速增压来说, 其等于储层压力  $p_f(x) = p_0$ 。对于给定的载荷, 如果  $K_1$  大于岩石模式 I 断裂强度  $K_{Ic}$ , 则初始缺陷长度将会扩散。可选地, 对于给定断裂强度和给定缺陷长度  $l_0$ , 我们将初始压力作为最小井眼压力进行求解, 此时模式 I 应力强度因子达到岩层断裂强度值。这可以通过在方程 (1) 上使用单一的勘根定理完成。

[0054] 换算

[0055] 我们采用井眼半径对缺陷长度和空间位置作换算。在这样做时, 我们定义了无量纲裂缝长度  $\gamma$ , 使得  $l = a\gamma$ 。使用临界应力强度因子对应力和压力作换算并且对该问题的特征长度开平方根: 井眼半径。由此, 定义出特征压力 / 应力  $p_* = K' / a^{1/2}$ , 其中,  $K' = \sqrt{32/\pi} K_{Ic}$ , 其中,  $K_{Ic}$  为岩层的模式 I 断裂强度 (因子  $\sqrt{32/\pi}$  被引入这里以与普通的水力压裂换算一致)。执行这种换算使得人们对岩层断裂强度和井眼尺寸的任意值来说都可以将量纲应力场  $\sigma/p_*$  和无量纲缺陷长度  $\gamma$  的作用进行对比。应力强度因子的方程可以用如下的无量纲形式重写:

$$[0056] \quad 1 = \frac{2\sqrt{32}}{\pi} \sqrt{\gamma} \int_0^\gamma \Pi(1+\xi) f\left(\frac{\xi}{\gamma}, \gamma\right) \frac{d\xi}{\gamma \sqrt{1-(\xi/\gamma)^2}}$$

[0057] 其中,  $\Pi = p/p_*$  为换算后的净压力。

[0058] 在后面, 我们使用特征压力为 2082PSI, 其是针对断裂强度为 **1360 PSI.  $\sqrt{Inch}$**  并且井眼直径为 8' 3/4" 获得的。

[0059] 缓慢增压

[0060] 图 6 为井眼初始压力与水平井的轴向和横向裂缝的初始缺陷长度 (缓慢增压) 之间关系的曲线图: 实例 #1 “Barnett”, 以及实例 #2 “Marcellus”。假设抗张强度为零的纵向裂缝的应力标准 (快速和缓慢) 以及最小水平应力也被显示出。

[0061] 图 7 为井眼初始压力与水平井的轴向和横向裂缝的初始缺陷长度 (缓慢增压) 之间关系的曲线图: 实例 #3 “Haynesville” 和实例 #4。假设抗张强度为零的纵向裂缝的应力标准 (快速和缓慢) 以及最小水平应力也被显示出。

[0062] 对于这里考虑的四个应力场来说, 假设缓慢增压的无量纲初始压力与纵向和

横向裂缝这两者的情况的初始缺陷长度之间的关系在图 5 和 6 中示出。作为参考,我们还示出了换算后的最小水平应力以及使用假设抗张强度为零的纵向裂缝的应力标准 (Hubbert-Willis 和 Haimson-Fairhurst 标准) 获得的初始压力。对于给定的缺陷长度,具有最低初始压力的裂缝几何特征是最有利的。由于应力集中效应,对于小的缺陷长度来说,与横向裂缝相比总是更容易产生纵向裂缝。对于给定的缺陷长度,根据应力场,在最有利裂缝几何特征中可能会或者可能不会产生交叉。

[0063] 我们明显地重新获得了这样的事实:对于实例 #1 (其在水平应力上没有差别):轴向裂缝总是有利的并且对于大的缺陷来说,两种类型的裂缝都是可能的。这些预期的结果与多个现场和实验室观察相一致。

[0064] 对于所有其它应力场的实例来说,对于比临界值  $\gamma_o^*$  大的无量纲缺陷长度来说,横向裂缝更加有利。这种临界值明显地取决于应力场。与实例 #2 和实例 #4 (走滑状态) 相比,实例 #3 在更小的值  $\gamma_o^*$  下发生从纵向到横向裂缝的这种转换。还值得注意的是,对于大的缺陷长度来说,横向裂缝的初始压力渐近线地朝向最小水平应力。

[0065] 快速增压

[0066] 我们观察到,对于横向裂缝来说,快速增压没有加载裂缝,因为 i) 流体在快速增压极限下没有渗透到裂缝中并且 ii) 井眼压力的增加没有对与横向裂缝正交的轴向应力产生影响。在快速增压极限下,横向缺陷不会扩散:流体需要渗透到缺陷中用以加载并且开始其扩散。因此,对于在快速增压极限下的横向裂缝来说,初始压力是无限大的。

[0067] 另一方面,对于纵向裂缝来说,井眼压力的升高提升了环向张应力。即使在该实例中还没有流体渗透到缺陷中,缺陷也能够开始扩散。在快速增压极限下纵向裂缝的初始压力明显高于缓慢增压的情形 (通常大约相差两倍)。

[0068] 材料各向异性的影响

[0069] 非传统的页岩具有弹性各向异性,具有由五个参数  $E_h$ ,  $E_v$ ,  $\nu_h$ ,  $\nu_v$  和  $G_v$  描述的横向各向同性对称性,其中,  $E_h/E_v > 0$ ,  $\nu_h/\nu_v > 0$  并且  $G_v/G_h > 0$ 。各向异性影响应力集中。它通过降低最小切向应力而降低了张断裂缝的初始压力。其还降低了最小轴向应力。因此,各向异性能够带来更接近于张断初始极限的切向和轴向应力集中并且有利于两种类型的裂缝存在 (在低差别应力场环境里)。

[0070] 在该部分执行的分析突显出在缓慢增压极限的情况下根据无量纲缺陷长度和远场应力哪种类型的裂缝需要更少的能量可以产生。我们还注意到在快速增压极限下,纵向裂缝总是比横向裂缝更有利,因为横向裂缝的初始压力是无限大的。这样的裂缝力学分析与单一的张应力分析相比对两种类型的裂缝之间的竞争的洞察更加深入。

[0071] 纵向与横向水力裂缝扩散

[0072] 目前为止执行的分析忽略了由裂缝中的流体流动引起的液-固耦合的影响。感兴趣的是,对真实增压速率对两种类型的水力裂缝几何特征 (即,在缓慢和快速增压极限情形之间) 的影响进行量化。为此,我们对横向和纵向裂缝从由流体注入产生的长度为  $l_o$  的初始缺陷开始的初始和早期扩散独立进行建模。我们考虑了与裂缝内部的流体流动和弹性变形以及注入系统的压缩系数和裂缝扩散所需的能量相关的完全的弹性-水力耦合。因此我们能够研究注入速率,流体粘度和注入系统压缩系数的组合影响。关注于相对致密的岩

层、例如页岩气中的早期扩散,我们忽略了地层中的流体漏失。我们还将讨论限制于牛顿流体。然而,我们的确考虑了井眼应力集中的影响。

[0073] 我们指定  $l(t)$  为裂缝标度:在横向裂缝的情况下为其半径,在纵向裂缝的情况下为裂缝的翼部中的一个的尺寸。我们指定  $w$  和  $p_f$  分别为裂缝开口和流体压力。净压力  $p$  被定义为流体压力减去与裂缝平面正交的侧限应力。我们的目的比较分别使一种或其它类型的裂缝几何特征扩散所需要的能量输入。换句话说,我们的目的是对一种给定类型的裂缝何时比其它的裂缝更容易水力扩散进行量化。

[0074] 我们假设恒定的注入速率为  $Q_0$  以及破裂前的给定井眼增压速率为  $\beta$ , 其实际中通常为大约每秒 60 到 100PSI。注入系统的压缩系数  $U$  (立方英尺/PSI) 由井眼和地面管道中的流体压缩系数以及井眼和管道自身的“弹性”得到。破裂前的注入速率和增压速率之间的简单关系为:  $U = Q_0/\beta$ 。为了对比两种几何特征,我们需要考虑纵向水力裂缝沿着井的轴线的尺度  $L_a$ , 其在这里使用平面应变结构建模。在其轴向标度上每单位长度进入纵向裂缝的流量由此被简化为  $Q_0/L_a$ , 而每单位长度的平面应变注入压缩系数为  $U/L_a$ 。

[0075] 换算

[0076] 让我们首先对控制这些水力裂缝扩散的变量进行换算以突出进入该问题的不同参数(应力,流体粘度,速率等等)的影响。如前面所述,我们相对于井眼半径  $a$  对裂缝长度并且相对于特征压力  $p_* = K'/a^{1/2}$  对所有的应力和压力进行换算。在这么做的同时,通过该问题的控制方程,我们能够获得后面的特征裂缝宽度  $w_*$  和时间尺度  $t_*$ , 同时例如强调了裂缝能量(韧性换算)的重要性。记录裂缝长度,净压力和裂缝宽度为  $l = L_* \gamma$ ,  $p = p_* \Pi$ ,  $w = w_* \Omega$ , 其中  $\gamma$ ,  $\Pi$ ,  $\Sigma$  和  $\Omega$  分别表示无量纲裂缝标度,净压力,远场应力,以及裂缝开口。

[0077] 横向水力裂缝

[0078] 对于径向横向水力裂缝的情况来说,可以按照如下的井眼-韧性换算关系(上标 T 表示横向几何特征)获得如下的衡量表示:

$$[0079] \quad l_*^T = a, p_*^T = K'/a^{1/2}, w_*^T = a^{1/2} K'/E', t_*^T = a^{5/2} K'/(E'Q_0) \quad (2)$$

[0080] 其中,  $E'$  为岩石地层的平面应变杨氏模量。该问题的解除了无量纲远场应力  $\Sigma = \sigma/p_*$  之外,仅仅取决于两个无量纲参数:无量纲粘度  $M^T$  和无量纲系统压缩系数  $U^T$ , 其定义如下:

$$[0081] \quad M^T = \frac{\mu E'^3 Q_0}{a K'^4}, \quad U^T = \frac{E' U}{a^3} \quad (3)$$

[0082] 纵向水力裂缝

[0083] 对于沿着井的轴向标度  $L_a$  的纵向平面应变水力裂缝来说,特征长度,压力和宽度尺度类似于横向裂缝的但是特征时间尺度  $t_*^L$  由于模型几何特征而稍微不同。时间尺度  $t_*^L$  可通过井眼半径  $a$  与纵向裂缝沿着井眼的轴向标度  $L_a$  之间的比率  $\alpha$  而与横向尺度相关(上标 L 表示纵向裂缝):

$$[0084] \quad \frac{t_*^L}{t_*^T} = \left( \frac{a}{L_a} \right)^{-1} = \alpha^{-1}$$

[0085] (4)

[0086] 纵向情况下的无量纲粘度  $M^L$  和压缩系数  $U^L$  同样与它们的横向定义成如下关联：

$$[0087] \frac{M^L}{M^T} = \frac{U^L}{U^T} = \frac{a}{L_a} = \alpha \tag{5}$$

[0088] 下面，将对我们的横向水力裂缝的井眼 - 韧度换算的结果进行讨论，其由方程 (2)-(3) 定义。我们会展示不同的横向无量纲粘度  $M^T$  和压缩系数  $U^T$  以及初始缺陷长度，远场应力和比率  $a/L_a$  对需要扩散两种类型的裂缝所需要的能量的影响。

[0089]

	2a	$E_V$	$E_H$	$\nu_V$	$\nu_H$	$K_{IC}$	$Q_0$	$\beta$	$\mu$
	(in)	(psi)	(psi)	(-)	(-)	(psi√in)	(barrels/min)	(psi/s)	(cp)
实例 1 "Barnett"	8 3/4"	4.0 10 <sup>6</sup>	5.4 10 <sup>6</sup>	0.19	0.21	1500	20	60-80	1-100
实例 2 "Marcellus"	8 3/4"	3.1 10 <sup>6</sup>	5.2 10 <sup>6</sup>	0.17	0.26	1500	20	60-80	1-100
实例 3 "Haynesville"	8 3/4"	2.8 10 <sup>6</sup>	5.2 10 <sup>6</sup>	0.17	0.25	1500	20	60-80	1-100
实例 4a-b "未公开"	8 3/4"	-	-	-	-	1500	20	60-80	1-100

[0090] 表 2

[0091] 表 2 汇总了研究的不同井场的弹性岩层特性的值的范围以及井场使用的典型的井眼大小、注入速率（每个射孔群）及增压速率。通过该表，我们能够获得无量纲粘度和压缩系数的值的范围。首先，无量纲压缩系数总是位于  $1 \times 10^6$  和  $2 \times 10^6$  之间。我们选择使用一个基本值  $1 \times 10^6$ 。无量纲粘度在 30 到 300 之间变化。在纵向裂缝的情况下，可以通过提取沿着井的轴向标度  $L_a$  的合理值来获取比率的值。将  $L_a$  作为射孔群的长度 ( $L_a \sim 3$  英尺)，我们得到值  $\alpha \approx 0.125$ ，对于代表射孔群 ( $L_a \sim 50-150$  英尺) 之间的间隔的标度来说，得到的  $\alpha \approx 0.005$ 。使用这两个值  $\alpha$  进行对比。最后，初始无量纲缺陷长度  $l_0/a = \gamma_0$  可以在 0.01 和 1.00 之间变化，其中较大的值代表大缺陷的出现（例如，平均意义上的射孔）。

[0092] 由于从真实现场值得到的数值较大的无量纲压缩系数，水力裂缝早期的扩散（达到井眼半径的十几倍）主要受井眼增压阶段由压缩性存储的流体的释放控制。尽管在样本的长度尺度上仍然可以控制扩散，但是在实验室试验中无量纲压缩系数通常要低得多。

[0093] 模拟

[0094] 为了模拟这两种类型的水力裂缝的生成和扩散，我们设计了一种能够处理两种几何特征结构的数字模拟器：纵向裂缝类似于双翼平面应变水力裂缝，而横向裂缝类似于从井眼开始的径向水力裂缝。该数字模拟器以完全耦合的方式对弹性 - 水力耦合，裂缝扩散，井眼应力集中以及注入系统压缩系数进行处理。该弹性方程使用位移不连续方法进行求解，在纵向裂缝中使用邻近于空穴的错位的弹性解，并且对于横向裂缝来说使用邻近于圆筒形井眼的环形错位的弹性解。使用有限体积方法对润滑油进行离散。使用耦合隐式算法来平衡流体流和弹性变形，同时使用长度控制算法来扩散裂缝。

[0095] 我们将扩散这些裂缝所需要的作为无量纲裂缝长度的函数的功率与限定最有利

的裂缝几何特征的较低的能量需求进行比较。系统的输入功率简化为等于  $Q_0 p_b$ ，其中， $p_b$  为井眼压力。限于注入速率  $Q_0$  不变的情况，输入能量的演变因此类似于无量纲井眼压力  $\pi_b$  的演变。值得注意的是，在这里使用的换算中特征功率输入  $W_*$  简化为  $p_* Q_0$ 。对于相同的特征压力  $p_* = 2082 \text{ PSI}$  以及每分钟 20 桶的注入速率，我们获得一个射孔群的特征功率大约为 1000 马力。

[0096] 结果

[0097] 对具有不同的无量纲粘度值 ( $M^T = 30, 300$ ) 和初始缺陷长度值的横向和纵向水力裂缝独立执行一系列的模拟。我们在后面关注于实例 #1 (无水平应力差) 和 #4 (具有大应力差的走滑状态) 的应力场。

[0098] 图 8 示出在应力场实例 #1 (“Barnett”) 中，对于高和低无量纲粘度来说作为裂缝长度的函数的井眼压力。对于纵向裂缝来说，还示出两种不同的井眼半径与轴向长度的比率  $\alpha$  的结果。在这些模拟中选取的初始缺陷长度  $\gamma_0 = 0.5$ 。可以观察到，对于数值相同的无量纲粘度，与横向裂缝相比，纵向裂缝总是需要较少的能量进行扩散。对于较小的缺陷长度也能得到类似的结果。需要指出的是，具有较大轴向标度 (即  $\alpha$  的值较小) 的纵向裂缝同样比较容易扩散。这是平面应变几何特征以及将裂缝每单位长度的注入速率定义为总注入流量之间的比率除以轴向标度的直接结果。较长的轴向标度产生较小的纵向无量纲粘度  $M^L = M^T$  并且由此降低了用于向断裂增压的流体所需要的粘性力。在所有的实例中，较高的无量纲粘度提高了裂缝扩散所需要的能量 - 水力压裂中常见的特征。

[0099] 图 8 示出具有类似的无量纲粘度值以及初始缺陷长度同样为 0.5 的应力场 #4 (走滑应力状态) 的情况。对于这样的初始缺陷长度，缓慢增压极限接近于与纵向裂缝相比更有利于横向裂缝的转变。实际上，与前面的部分相比，应力强度因子的数字估计稍微有所不同，在那种情况力横向裂缝在初始时稍微更有利并且随着扩散继续而保持趋势不变：对那种情况来说横向裂缝总是需要更少的能量。然而，对于较小的初始缺陷 (即， $\gamma_0 = 0.02$ )，如图 10 所示，初始更有利的纵向裂缝在给定裂缝长度之上比横向裂缝需要更多的能量。朝向更有利的横向裂缝的这种转变是该应力场本质上所具有的，但是其发生的长度受到初始缺陷长度，无量纲粘度和压缩系数的控制。较高的无量纲粘度拖延了朝向横向裂缝的这种转变。同样重要的是需要注意到，对这里给出的情况，在横向裂缝变得更有利的情况下，裂缝长度相对较大 (是井眼半径的三十倍以上)。如果在这种尺度下遇到应力或岩石障碍，那么裂缝几何特征的假设 (径向和平面应变) 可能变得有问题。

[0100] 绘制出井眼压力作为水力裂缝长度的函数的曲线图。图 8 为井眼压力 (即，输入功率) 作为水力裂缝长度的函数的曲线图 - 实例 #1 应力场。无量纲粘度  $M^T$  和轴向标度 (仅纵向裂缝) 的影响， $U^T = 10^6$ ，初始缺陷长度为 0.5。同样，图 9 为井眼压力 (即，输入功率) 作为水力裂缝长度的函数的曲线图 - 实例 #4 应力场。无量纲粘度  $M^T$  和轴向标度 (仅纵向裂缝) 的影响， $U^T = 10^6$ ，初始缺陷长度为 0.5。图 10 为井眼压力 (即，输入功率) 作为水力裂缝长度的函数的曲线图 - 实例 #4 应力场。 $M^T = 30$  并且轴向标度  $\alpha = 0.005$  (仅纵向裂缝)， $U^T = 10^6$ ，初始缺陷长度为 0.02。最后，图 11 为井眼压力 (即，输入功率) 作为水力裂缝长度的函数的曲线图 - 实例 #4 应力场。下降系统压缩系数的冲击  $U^T = 10^4$ ；无量纲粘度  $M^T = 30$ ，初始缺陷长度为 0.5。

[0101] 最后，感兴趣的是，研究值较小的无量纲系统压缩系数对轴向和横向裂缝之间的

竞争可能产生的影响。较小的值对应于较大的增压速率（对于相同的注入速率）。对于应力场 #4, 无量纲粘度为 300 并且压缩系数  $U^T = 10^{-4}$  (更类似于实验室规模的实验), 可以从图 10 看出尽管用于横向裂缝的能量初始稍微小一点, 但是纵向裂缝变得更容易扩散。已经对这种系统压缩系数 / 增压速率的影响进行了实验上的观察。在给定的应力场中, 尽管仅在低速率下观察到横向裂缝, 但是横向和轴向两种水力裂缝都在大的速率下生成。这种观察还可以通过快速和缓慢增压极限的差值定性解释, 其中在快速增压的情况下纵向裂缝总是需要较少的能量。在现场应用中, 由于较大值的系统压缩系数使得这种转变 (从横向裂缝到纵向裂缝) 不太可能发生。在表示现场条件的无量纲系统压缩系数中, 对于较大的裂缝长度来说, 在我们的模拟中从来没有观察到从最初有利的横向裂缝转变回更有利的纵向裂缝。当分析不太可能严格代表现场条件的实验室测试时, 需要时刻记住系统压缩系数的这种影响。

[0102] 缓慢增压的假设为一种掌握对于给定应力场中的两种类型的裂缝几何特征的生成之间的竞争的好方法。然而, 由于考虑了完全液 - 固耦合, 可以看到无量纲粘度和注入系统压缩系数可能拖延朝向横向裂缝 (较大的粘度) 的转变, 或者对于低的系统压缩系数 (尽管比现场条件更接近于实验室设置) 来说, 甚至可能在一定条件下促进轴向裂缝, 而不是更有利于横向裂缝。

[0103] 在实际情况下, 我们的研究确认了现场实验中径向缺口的产生是促进横向裂缝的最好方法。这里的益处包括将径向缺口的优势与多级压裂的实际约束相结合。



图 1

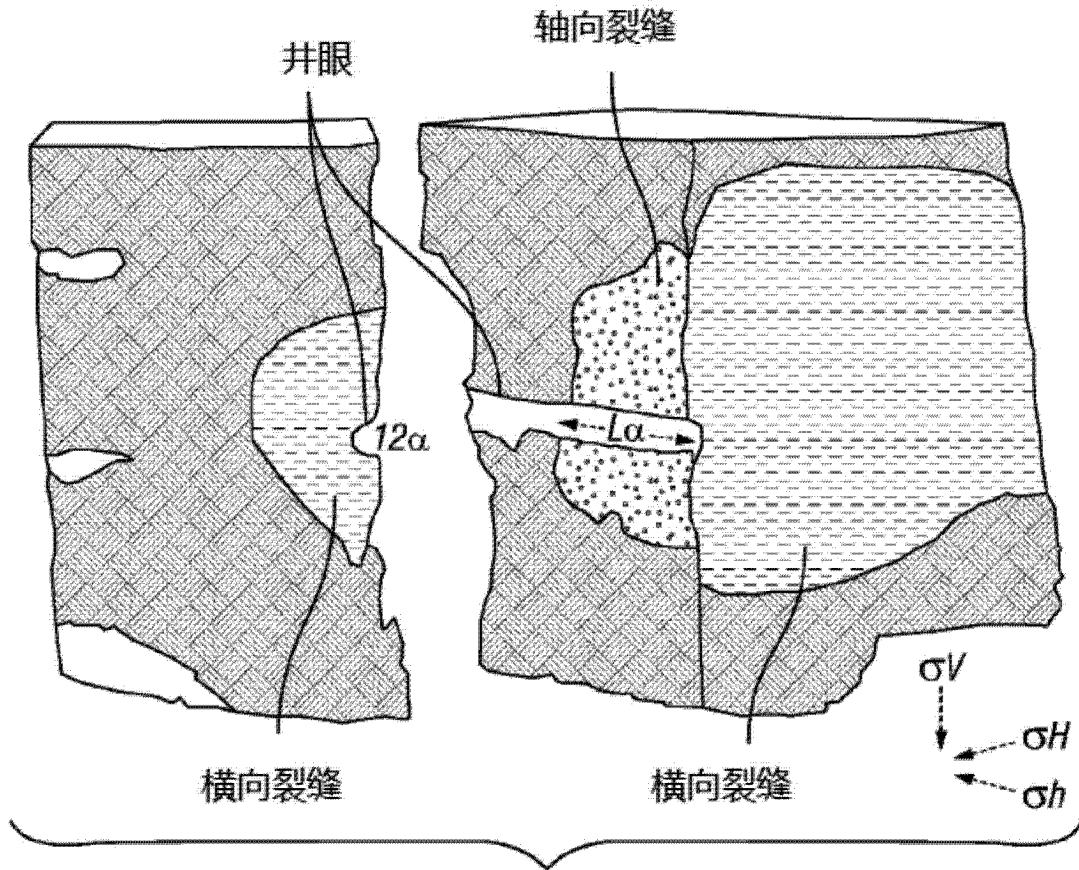


图 2

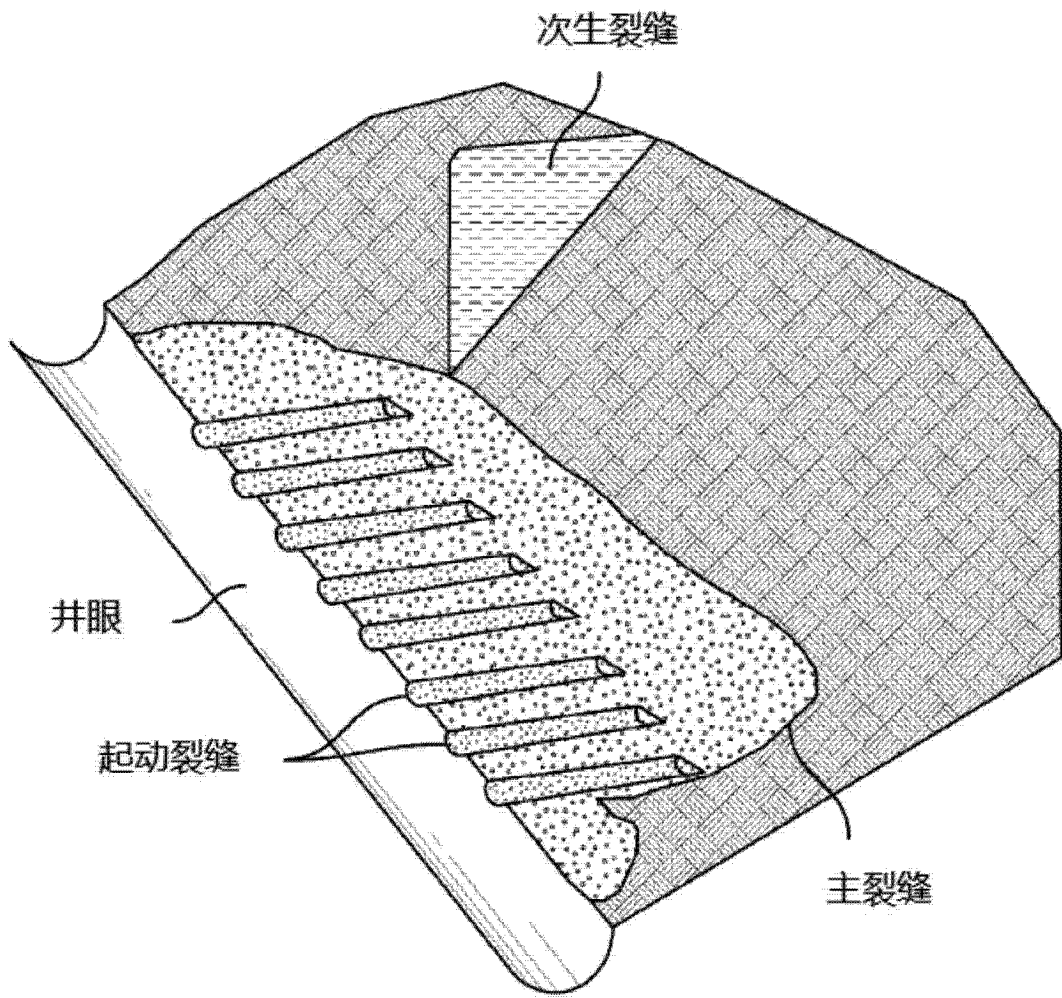


图 3



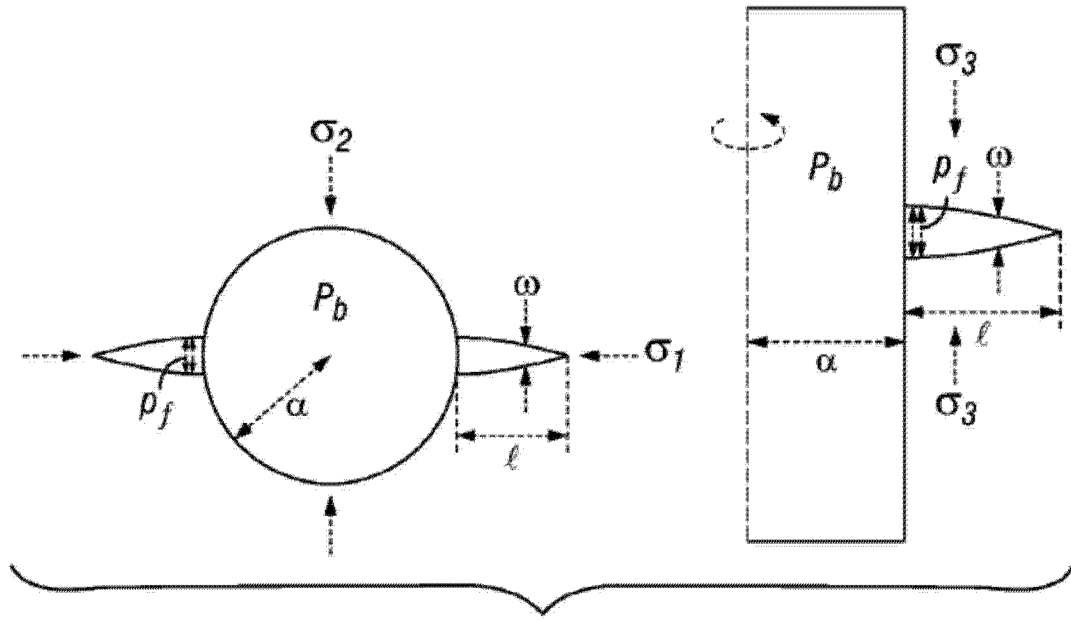


图 4

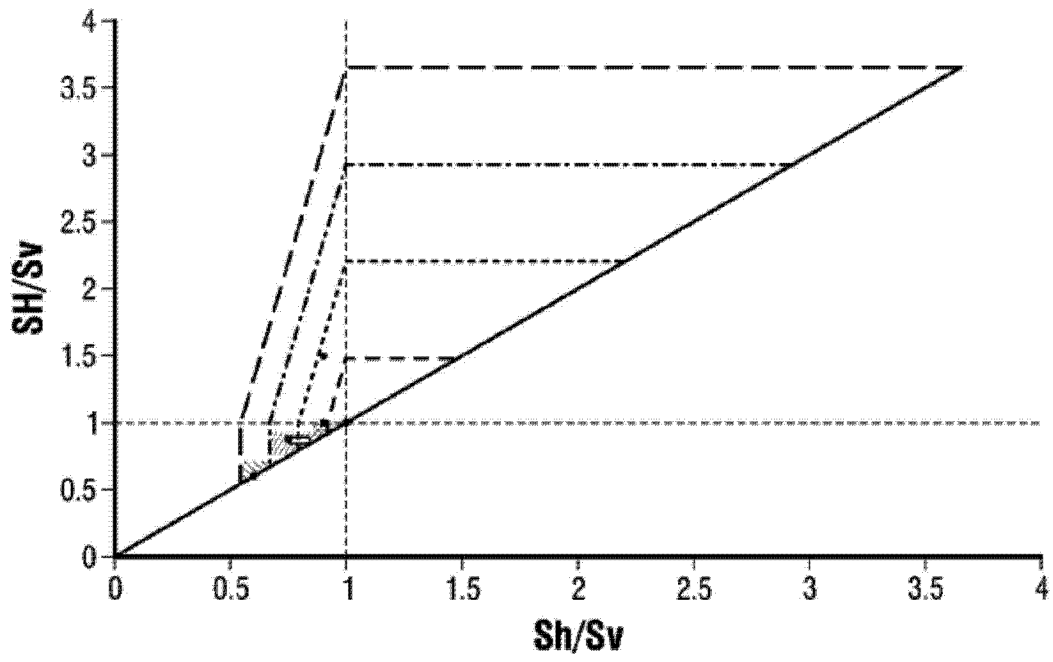


图 5

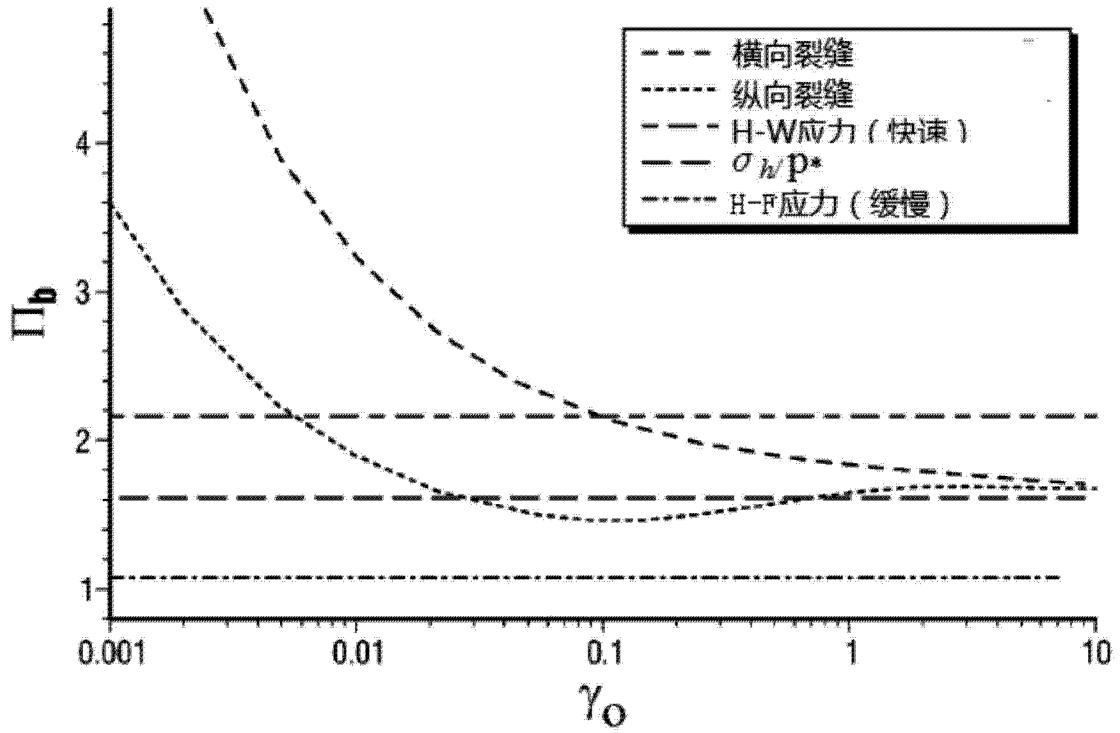


图 6A

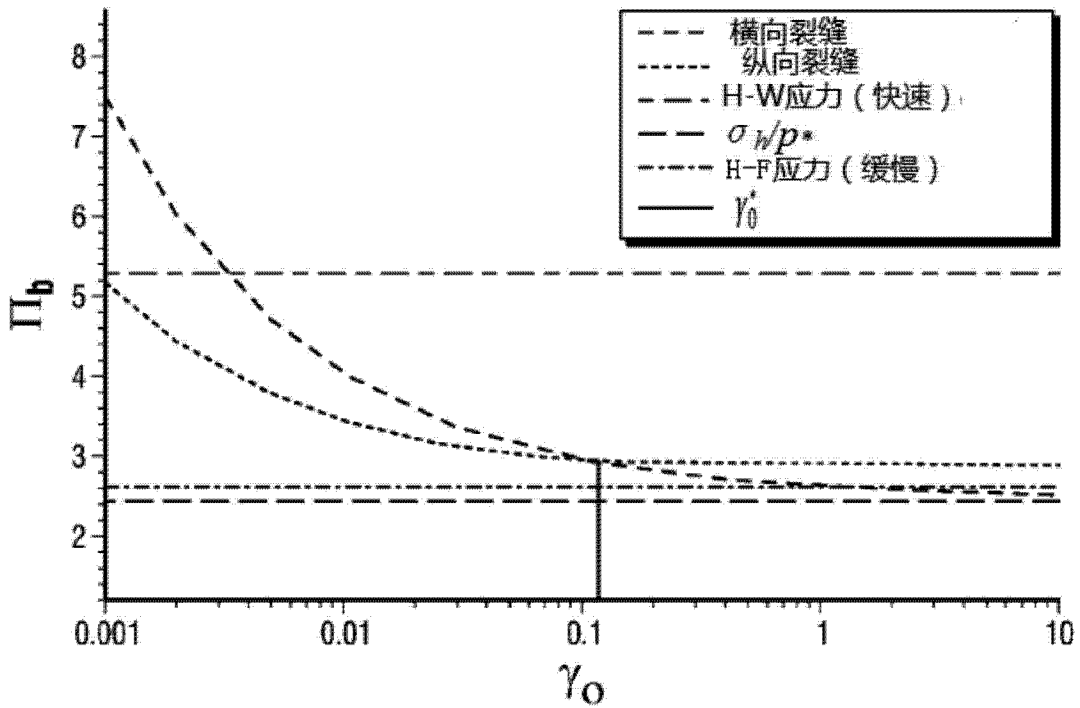


图 6B

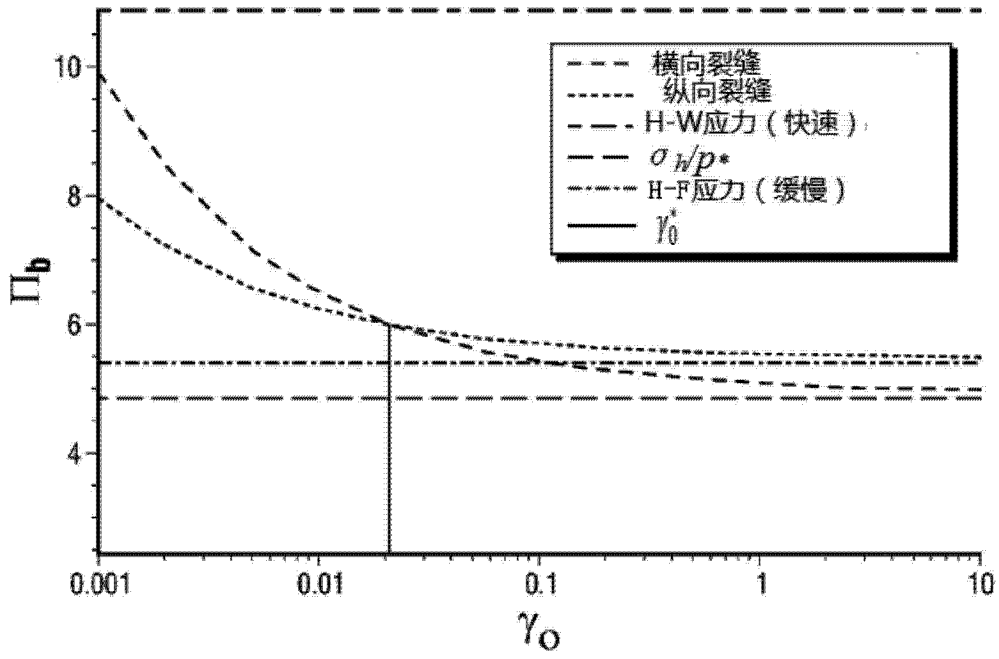


图 7A

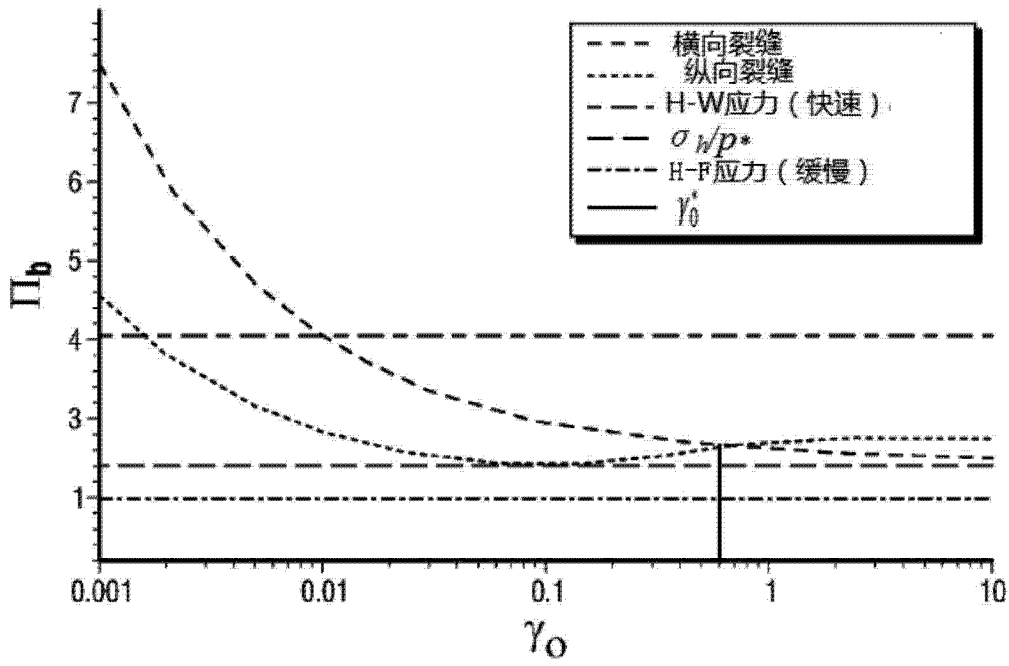


图 7B

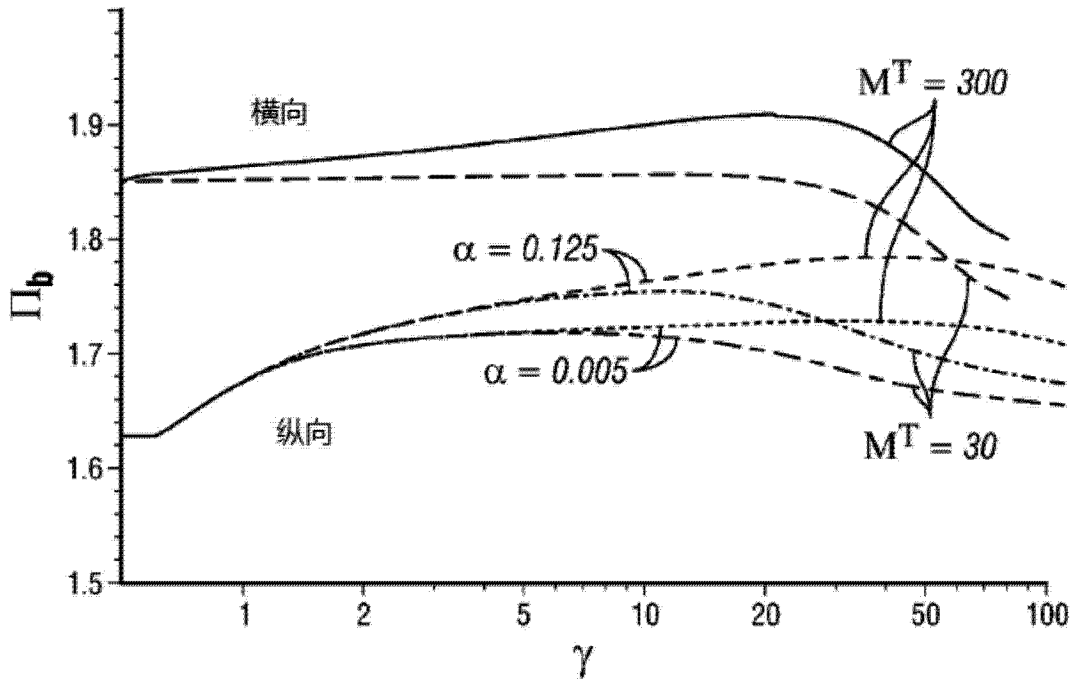


图 8

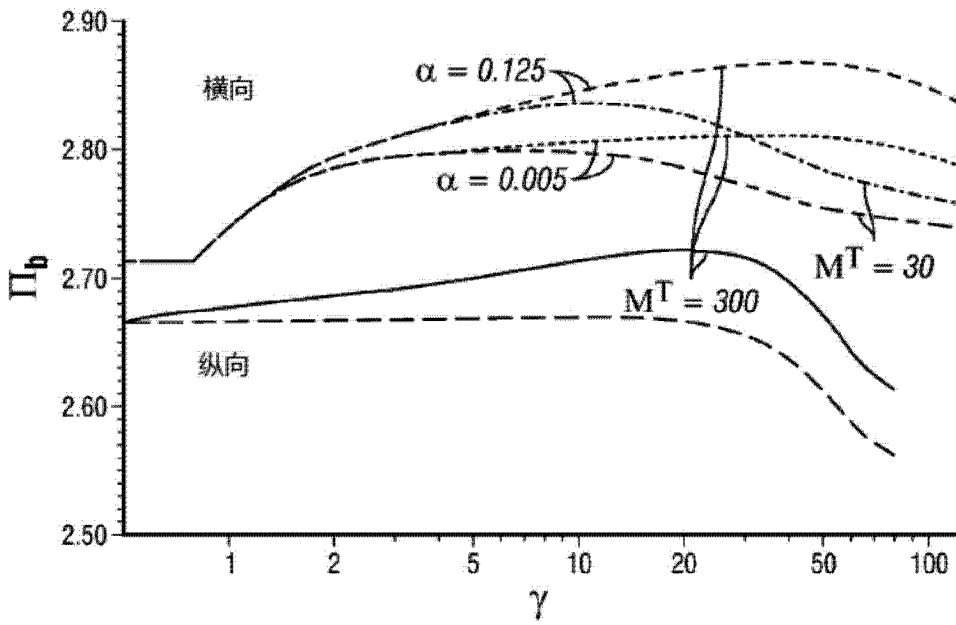


图 9

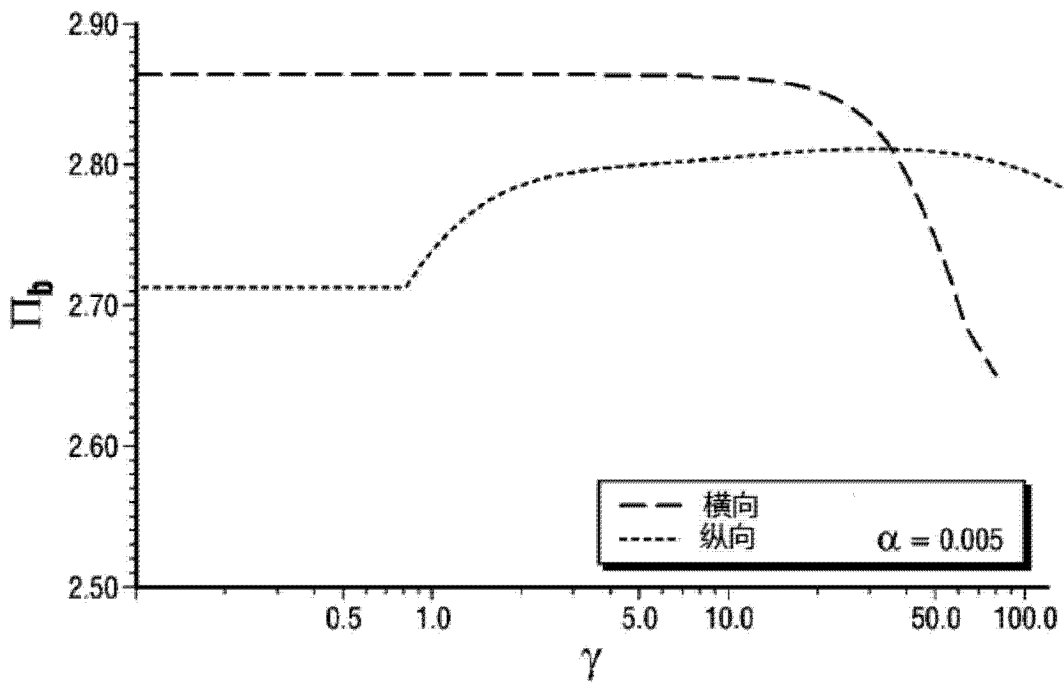


图 10

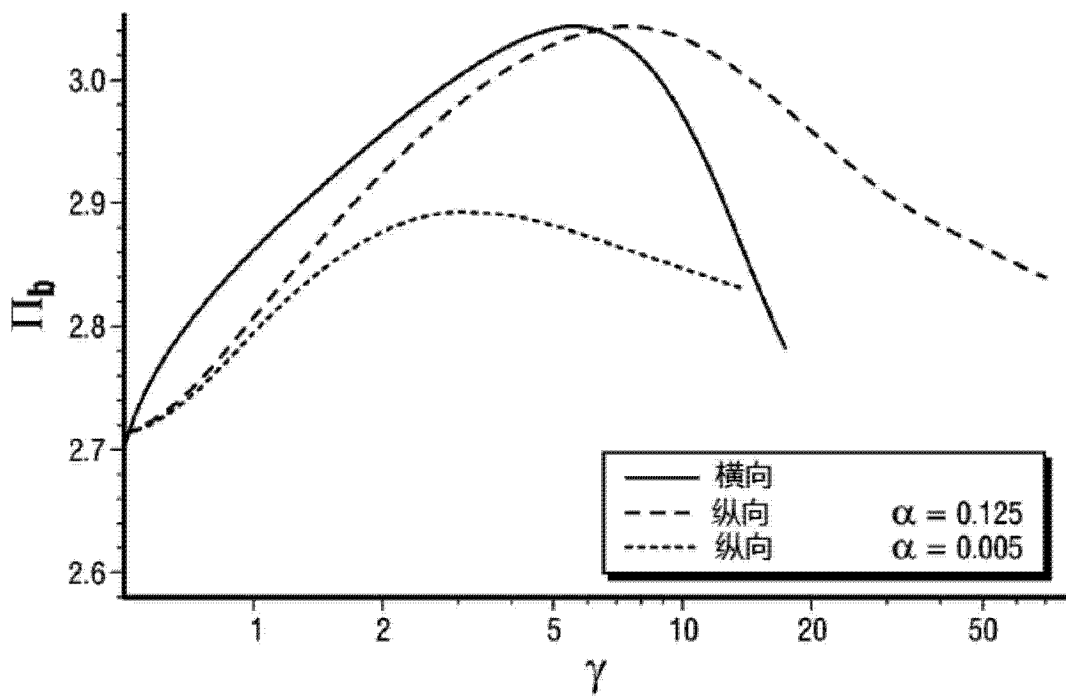


图 11