



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 106295235 B

(45)授权公告日 2018. 10. 30

(21)申请号 201610806787.X

(22)申请日 2016.09.07

(65)同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 106295235 A

(43)申请公布日 2017.01.04

(73)专利权人 西南石油大学
地址 610500 四川省成都市新都区新都大道8号

(72)发明人 卢聪 郭建春 许鑫

(74)专利代理机构 成都金英专利代理事务所
(普通合伙) 51218

代理人 袁英

(51) Int. Cl.

G06F 19/00(2018.01)

E21B 49/00(2006.01)

(56)对比文件

CN 1916359 A, 2007.02.21,

CN 105114065 A, 2015.12.02,

US 2015/0218925 A1, 2015.08.06,

周健等. 压裂中天然裂缝剪切破坏机制研究.《岩石力学与工程学报》.2008,第27卷第2637-2641页.

审查员 顾明海

权利要求书2页 说明书6页 附图1页

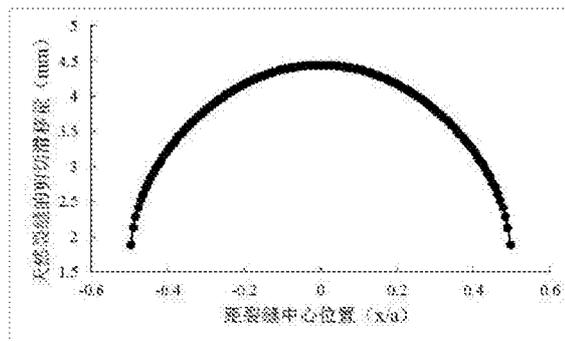
(54)发明名称

一种页岩地层天然裂缝剪切滑移量的计算方法

(57)摘要

本发明公开了一种页岩地层天然裂缝剪切滑移量的计算方法,依次包括以下步骤:(A)计算天然裂缝所受的正应力 σ_n 和剪应力 τ ; (B)基于裂缝中流体的压力以及步骤(A)的计算结果,判断天然裂缝的开启方式; (C)将缝长为 a 的天然裂缝划分为长度相等的 N 个单元体,每个单元体长度为 $\frac{a}{N}$; (D)基于步骤(B)的判断结果和步骤(C)

的单元体划分方式,采用位移不连续方法计算天然裂缝的剪切滑移量。本发明根据天然裂缝的基础参数以及其受力状态判断天然裂缝的开启方式,在给定的天然裂缝长度、角度、摩擦系数以及页岩地层岩石力学参数的前提下,采用位移不连续方法计算天然裂缝的剪切滑移量,原理可靠,操作简单,为页岩地层水力压裂施工参数优化提供了重要的指导依据。



1. 一种页岩地层天然裂缝剪切滑移量的计算方法,依次包括以下步骤:

(A) 计算天然裂缝壁面所受的正应力 σ_n 和剪应力 τ ;

(B) 基于裂缝内流体压力以及步骤(A)的计算结果,判断天然裂缝的开启方式:

$\sigma_n < P < \sigma_n + \frac{\tau_0 - \tau}{K_f}$ 时,天然裂缝法向张开;

$P > \sigma_n + \frac{\tau_0 - \tau}{K_f}$ 时,天然裂缝剪切破坏;

其中: σ_n —天然裂缝壁面所受的正应力,MPa,

P —裂缝内流体压力,MPa,

τ_0 —岩石内聚力,MPa,

K_f —裂缝面的摩擦系数,无因次,

τ —裂缝所受的剪应力,MPa;

(C) 将天然裂缝长度为 a 的天然裂缝划分为长度相等的 N 个单元体,每个单元体长度为 $\frac{a}{N}$;

(D) 基于步骤(B)的判断结果和步骤(C)的单元体划分方式,采用位移不连续方法计算天然裂缝的剪切滑移量:

当天然裂缝法向张开时,任意一个单元体 i 所受应力与其剪切滑移量满足以下方程:

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^N A_{ss}^{i,j} D_s^j = \sigma_s^i = 0 \\ \sum_{j=1}^N A_{nn}^{i,j} D_n^j = \sigma_n^i = P - \sigma_n \end{cases} \quad \text{其中 } i=1,2,3\cdots N; j=1,2,3\cdots N$$

当天然裂缝剪切破坏时,任意一个单元体 i 所受应力与其剪切滑移量满足以下方程:

$$\begin{cases} D_n^i = 0 \\ \sum_{j=1}^N A_{ss}^{i,j} D_s^j = \sigma_s^i = \tau \end{cases} \quad \text{其中 } i=1,2,3\cdots N; j=1,2,3\cdots N$$

其中, $A_{ss}^{i,j}$ 、 $A_{nn}^{i,j}$ 为应力边界影响系数,其表达式为:

$$A_{ss}^{i,j} = A_{nn}^{i,j} = -2Gf_{xx}^-$$

$$f_{xx}^- = \frac{a}{2\pi N(1-\mu) \left(\bar{x}^2 - \frac{a^2}{N^2} \right)}$$

$$\bar{x} = |i-j| \frac{a}{N}$$

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)}$$

式中: σ_n —天然裂缝壁面所受的正应力,MPa,

P —裂缝内流体压力,MPa,

τ —裂缝所受的剪应力,MPa,

σ_n^i —单元体*i*所受的正应力,MPa,

σ_s^j —单元体*i*所受的剪应力,MPa,

D_n^j —第*j*个单元体的法向位移量,m,

D_s^j —第*j*个单元体的剪切滑移量,m,

D_n^i —第*i*个单元体的法向位移量,m,

N —单元体的个数,

G —岩石的剪切应变模量,MPa,

E —岩石的杨氏模量,MPa,

μ —泊松比,无因次,

a —天然裂缝长度,m,

i —第*i*个单元体,

j —第*j*个单元体;

联立求解*N*个单元体的应力—滑移量方程组,即可得到每个单元体的剪切滑移量,最终得出天然裂缝的剪切滑移量。

2.如权利要求1所述的一种页岩地层天然裂缝剪切滑移量的计算方法,其特征在于,所述步骤(A)计算天然裂缝壁面所受的正应力 σ_n 和剪应力 τ ,过程如下:

$$\sigma_n = \frac{\sigma_H + \sigma_h}{2} + \frac{\sigma_H - \sigma_h}{2} \cos 2\theta$$

$$\tau = \frac{\sigma_H - \sigma_h}{2} \sin 2\theta$$

式中: σ_H —水平最大主应力,MPa,

σ_h —水平最小主应力,MPa,

θ —裂缝的角度,rad。

一种页岩地层天然裂缝剪切滑移量的计算方法

技术领域

[0001] 本发明涉及石油工程领域水力压裂过程中一种页岩地层天然裂缝剪切滑移量的计算方法。

背景技术

[0002] 水力压裂技术是油气藏增产改造的重要措施。水力压裂是利用地面高压泵组,以超过地层吸收能力的排量将压裂液泵入地层来产生裂缝,然后继续注入带有支撑剂(砂粒)的压裂液,使裂缝继续延伸并在其中充填支撑剂,当压裂液返排后,在地层压力作用下,支撑剂在裂缝中起到支撑裂缝的作用,阻止裂缝闭合,从而在地层中形成具有一定长度、允许流体流动的填砂裂缝。

[0003] 清水压裂是水力压裂的一种形式,被广泛应用于页岩油气藏的增产改造中。它的特点是不加入支撑剂,仅通过泵入低粘度压裂液,在页岩地层中产生人工裂缝,并沟通天然裂缝,以形成复杂的裂缝网络体系,提高流体的流动能力。通常情况下,页岩地层中原有的天然裂缝处于闭合状态,无法为流体提供流动通道。在清水压裂过程中,当人工裂缝与天然裂缝相交时,会促使天然裂缝产生剪切滑移,同时由于裂缝表面凹凸不平,即使天然裂缝中未充填支撑剂,裂缝表面凸起也可以相互支撑,使天然裂缝在闭合压力的作用下保持一定的开启程度,以此为流体提供流动通道,达到改善油气流动条件和油气井增产的目的。

[0004] 裂缝剪切滑移量是指裂缝两个表面相对位移的大小,为了使裂缝表面的凸起相互支撑,天然裂缝必须具备一定的剪切滑移量,否则,裂缝的两个粗糙表面在闭合压力的作用下将会完全啮合而无法为流体提供流动通道。现有的研究表明,天然裂缝的剪切滑移量影响了水力压裂的增产效果,因此,准确地计算剪切滑移量对压裂施工参数优化具有重要的指导意义。

[0005] 天然裂缝的剪切滑移量与裂缝的长度、角度以及裂缝面的摩擦系数有关。裂缝角度是指沿顺时针方向,裂缝与水平最大主应力的夹角。摩擦系数指裂缝滑动时,摩擦力与裂缝面所受的正压力的比值。剪切滑移量计算的目的是在给定的裂缝长度、角度以及裂缝面摩擦系数的基础上,计算天然裂缝不同位置处的剪切滑移量。

[0006] 位移不连续方法是岩体工程研究中常用的数值计算方法,由于其直接以裂缝面上的相对位移为未知量,因此在求解裂缝面受力大小和位移量时更加简单、方便。

[0007] 目前国内外已有的研究成果大多集中于天然裂缝剪切滑移机理的研究,而对剪切滑移量的研究仍停留在定性的认识上,缺乏定量化的计算方法,难以满足生产的需求。

发明内容

[0008] 本发明的目的在于提供一种页岩地层天然裂缝剪切滑移量的计算方法,该方法原理可靠,操作简单,能够在给定天然裂缝和岩石基础参数的前提下,计算裂缝不同位置处的剪切滑移量。

[0009] 为达到以上技术目的,本发明提供以下技术方案。

[0010] 本发明根据天然裂缝的基础参数以及其受力状态判断天然裂缝的开启方式,以此为基础,在给定的天然裂缝长度、角度、摩擦系数以及页岩地层岩石力学参数的前提下,采用位移不连续方法计算天然裂缝的剪切滑移量。

[0011] 一种页岩地层天然裂缝剪切滑移量的计算方法,依次包括以下步骤:

[0012] (A) 计算天然裂缝所受的正应力 σ_n 和剪应力 τ :

$$[0013] \quad \sigma_n = \frac{\sigma_H + \sigma_h}{2} + \frac{\sigma_H - \sigma_h}{2} \cos 2\theta$$

$$[0014] \quad \tau = \frac{\sigma_H - \sigma_h}{2} \sin 2\theta$$

[0015] 式中: σ_n —裂缝壁面所受的正应力,MPa;

[0016] τ —裂缝所受的剪应力,MPa;

[0017] σ_H —水平最大主应力,MPa;

[0018] σ_h —水平最小主应力,MPa;

[0019] θ —裂缝的角度,rad。

[0020] (B) 基于裂缝中流体的压力以及步骤(A)的计算结果,判断天然裂缝的开启方式:

[0021] (1) 天然裂缝法向张开,判断依据为: $\sigma_n < P < \sigma_n + \frac{\tau_0 - \tau}{K_f}$ ($\tau_0 > \tau$)。此时,天然裂缝

所受的剪应力小于裂缝的剪切强度,但缝内流体压力大于裂缝所受的正应力,裂缝发生张性破坏。

[0022] (2) 天然裂缝剪切破坏,判断依据为: $P > \sigma_n + \frac{\tau_0 - \tau}{K_f}$ 。此时,天然裂缝所受的剪应力

大于裂缝的剪切强度,裂缝发生剪切破坏。

[0023] 其中: σ_n —裂缝壁面所受的正应力,MPa;

[0024] P —裂缝内流体压力,MPa;

[0025] τ_0 —岩石内聚力,MPa;

[0026] K_f —裂缝面的摩擦系数,无因次;

[0027] τ —裂缝所受的剪应力,MPa。

[0028] (C) 将缝长为 a 的天然裂缝划分为长度相等的 N 个单元体,每个单元体长度为 $\frac{a}{N}$ 。

[0029] (D) 基于步骤(B)的判断结果和步骤(C)的单元体划分方式,采用位移不连续方法计算天然裂缝的剪切滑移量:

[0030] (1) 当天然裂缝法向张开时,任意一个单元体 i 所受应力与其剪切滑移量满足以下方程:

$$[0031] \quad \begin{cases} \sum_{j=1}^N A_{ss}^{i,j} D_s^j = \sigma_s^i = 0 \\ \sum_{j=1}^N A_{nn}^{i,j} D_n^j = \sigma_n^i = P - \sigma_n \end{cases} \quad (i=1, 2, 3 \dots N; j=1, 2, 3 \dots N)$$

[0032] (2) 当天然裂缝剪切破坏时,任意一个单元体 i 所受应力与其剪切滑移量满足以下方程:

$$[0033] \quad \begin{cases} D_n^i = 0 \\ \sum_{j=1}^N A_{ss}^{i,j} D_s^j = \sigma_s^i = \tau \end{cases} \quad (i=1, 2, 3 \dots N; j=1, 2, 3 \dots N)$$

[0034] 其中, $A_{ss}^{i,j}$ 、 $A_{nn}^{i,j}$ 为应力边界影响系数, 其表达式为:

$$[0035] \quad A_{ss}^{i,j} = A_{nn}^{i,j} = -2Gf_{xx}^i$$

$$[0036] \quad f_{xx}^i = \frac{a}{2\pi N(1-\mu) \left(\bar{x}^2 - \frac{a^2}{N^2} \right)}$$

$$[0037] \quad \bar{x} = |i-j| \frac{a}{N}$$

$$[0038] \quad G = \frac{E}{2(1+\mu)}$$

[0039] 式中: σ_n —裂缝壁面所受的正应力, MPa;

[0040] P—裂缝内流体压力, MPa;

[0041] τ —裂缝所受的剪应力, MPa;

[0042] σ_n^i —单元体 i 所受的正应力, MPa;

[0043] σ_s^i —单元体 i 所受的剪应力, MPa;

[0044] D_n^j —第 j 个单元体的法向位移量, m;

[0045] D_s^j —第 j 个单元体的剪切滑移量, m;

[0046] D_n^i —第 i 个单元体的法向位移量, m;

[0047] N—单元体的个数;

[0048] G—岩石的剪切应变模量, MPa;

[0049] E—岩石的杨氏模量, MPa;

[0050] μ —泊松比, 无因次;

[0051] a—天然裂缝长度, m;

[0052] i—第 i 个单元体;

[0053] j—第 j 个单元体。

[0054] 联立求解 N 个单元体的应力—滑移量方程组, 即可得到每个单元体的剪切滑移量, 最终得出天然裂缝的剪切滑移量。

[0055] 所述步骤 (A) 中, 采用了二维线弹性理论计算裂缝面所受的正应力 σ_n 和剪应力 τ (参考文献: 周健, 陈勉, 金衍, 等. 压裂中天然裂缝剪切破坏机制研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27: 2637~2641)。

[0056] 对步骤 (B) 中天然裂缝开启方式的判断依据做如下说明:

[0057] 当天然裂缝所受的剪应力超过剪切强度时, 裂缝发生剪切破坏而产生剪切裂缝, 此时, 裂缝内流体压力满足:

$$[0058] \quad \tau > \tau_0 + K_F (\sigma_n - P)$$

[0059] 可得:

$$[0060] \quad P > \sigma_n + \frac{\tau_0 - \tau}{K_f}$$

[0061] 当天然裂缝发生张性破坏时,裂缝内流体压力需大于裂缝所受的正压力,以支撑裂缝壁面,防止裂缝闭合。同时,裂缝所受的剪应力应小于裂缝的剪切强度,因此,裂缝内流体压力满足:

$$[0062] \quad \sigma_n < P < \sigma_n + \frac{\tau_0 - \tau}{K_f}$$

[0063] 式中: σ_n —裂缝壁面所受的正应力,MPa;

[0064] P—裂缝内流体压力,MPa;

[0065] τ_0 —岩石内聚力,MPa;

[0066] K_f —裂缝面的摩擦系数,无因次;

[0067] τ —裂缝所受的剪应力,MPa。

[0068] 所述步骤(D)中,天然裂缝剪切滑移量的推导过程如下:

[0069] (1) 由Green函数可得天然裂缝边界上任意一点的位移为:

$$[0070] \quad \bar{u}_s = -\frac{1}{\pi} \frac{\partial}{\partial y} A \int_C \left(\ln \frac{1}{r_0} \right) \bar{u}_s dl$$

[0071] (2) 在步骤(1)的基础上,根据弹性力学理论,任一单元体i的剪应力和法应力可以由单元体j的位移不连续量计算得到:

$$[0072] \quad \sigma_s^i = \sum_{j=1}^N A^{i,j}_{ss} D_s^j + \sum_{j=1}^N A^{i,j}_{sn} D_n^j$$

$$[0073] \quad \sigma_n^i = \sum_{j=1}^N A^{i,j}_{ns} D_s^j + \sum_{j=1}^N A^{i,j}_{nn} D_n^j$$

[0074] (3) 根据天然裂缝的破坏形式,确定裂缝中每一个单元体的边界条件。

[0075] 对于法向张开的天然裂缝:

$$[0076] \quad \begin{cases} \sigma_s^i = 0 \\ \sigma_n^i = P - \sigma_n \end{cases}$$

[0077] 对于剪切破坏的天然裂缝:

$$[0078] \quad \begin{cases} D_n^i = 0 \\ \sigma_s^i = \tau \end{cases}$$

[0079] (4) 将边界条件带入步骤(2)中,即可得到各单元体的剪切滑移量。

[0080] 式中: \bar{u}_s —天然裂缝边界上任意一点的位移,m;

[0081] A—与该点位置有关的系数;

[0082] σ_s^i —第i个单元体所受的剪应力,MPa;

[0083] σ_n^i —第i个单元体所受的正应力,MPa;

[0084] N—单元体的个数;

[0085] D_n^j —第j个单元体的法向位移量,m;

[0086] D_s^j —第j个单元体的剪切滑移量,m;

[0087] D_n^i —第*i*个单元体的法向位移量,m;

[0088] σ_n —裂缝壁面所受的正应力,MPa;

[0089] P —裂缝内流体压力,MPa;

[0090] τ —裂缝所受的剪应力,MPa;

[0091] $A_{ss}^{i,j}$ 、 $A_{sn}^{i,j}$ 、 $A_{ns}^{i,j}$ 、 $A_{nn}^{i,j}$ 为应力边界影响系数,当天然裂缝未发生弯曲时, $A_{sn}^{i,j}$ 、 $A_{ns}^{i,j}$ 均等于零。

[0092] 与现有技术相比,本发明的有益效果是:采用该方法可以较为精确地计算页岩地层天然裂缝的剪切滑移量,该方法计算方式简单,为页岩地层水力压裂施工参数优化提供了重要的指导依据。

附图说明

[0093] 图1是天然裂缝剪切滑移量的计算结果。

具体实施方式

[0094] 下面以某页岩地层实际参数为例,结合附图,对本发明的步骤进行详细说明。

[0095] 页岩地层各项参数表

[0096]

| | |
|--------------|-----------------|
| 杨氏模量(MPa) | 20000 |
| 泊松比 | 0.25 |
| 最小主应力(MPa) | 30 |
| 最大主应力(MPa) | 40 |
| 内聚力(MPa) | 5 |
| 裂缝角度 (rad) | $\frac{\pi}{3}$ |
| 裂缝长度(m) | 15 |
| 裂缝面摩擦系数 | 0.7 |
| 裂缝内流体压力(MPa) | 35 |

[0097] 一种页岩地层天然裂缝剪切滑移量的计算方法,依次包括以下步骤:

[0098] (A) 计算天然裂缝所受的正应力 σ_n 和剪应力 τ :

$$[0099] \quad \sigma_n = \frac{\sigma_H + \sigma_h}{2} + \frac{\sigma_H - \sigma_h}{2} \cos 2\theta$$

$$[0100] \quad \tau = \frac{\sigma_H - \sigma_h}{2} \sin 2\theta$$

[0101] 式中: σ_n —裂缝壁面所受的正应力,MPa;

[0102] τ —裂缝所受的剪应力,MPa;

[0103] σ_H —水平最大主应力,MPa;

[0104] σ_h —水平最小主应力,MPa;

[0105] θ —裂缝的角度,rad。

[0106] 各项参数的计算结果

[0107]

| 正应力 (MPa) | 剪应力 (MPa) |
|-----------|-----------|
| 32.5 | 4.33 |

[0108] (B) 基于裂缝中流体的压力以及步骤 (A) 的计算结果,可判断该天然裂缝满足:

$$P > \sigma_n + \frac{\tau_0 - \tau}{K_f}, \text{因此,该裂缝为剪切破坏。}$$

[0109] (C) 将该天然裂缝划分为长度相等的150个单元体,每个单元体长度为0.1m。

[0110] (D) 基于步骤 (B) 的判断结果和步骤 (C) 的单元体划分方式,采用位移不连续方法计算天然裂缝的剪切滑移量:

$$[0111] \begin{cases} D_n^i = 0 \\ \sum_{j=1}^N A_{ss}^{ij} D_s^j = \sigma_s^i = \tau \end{cases} \quad (i=1, 2, 3 \dots 150; j=1, 2, 3 \dots 150)$$

[0112] 其中, A_{ss}^{ij} 、 A_{nn}^{ij} 为应力边界影响系数,其表达式为:

$$[0113] A_{ss}^{ij} = A_{nn}^{ij} = -2Gf_{xx}$$

$$[0114] f_{xx} = \frac{a}{2\pi N(1-\mu) \left(\bar{x}^2 - \frac{a^2}{N^2} \right)}$$

$$[0115] \bar{x} = |i-j| \frac{a}{N}$$

$$[0116] G = \frac{E}{2(1+\mu)}$$

[0117] 式中: σ_n —裂缝壁面所受的正应力,MPa;

[0118] P—裂缝内流体压力,MPa;

[0119] τ —裂缝所受的剪应力,MPa;[0120] σ_n^i —单元体 i 所受的正应力,MPa;[0121] σ_s^i —单元体 i 所受的剪应力,MPa;[0122] D_n^j —第 j 个单元体的法向位移量,m;[0123] D_s^j —第 j 个单元体的剪切滑移量,m;[0124] D_n^i —第 i 个单元体的法向位移量,m;

[0125] N—单元体的个数;

[0126] G—岩石的剪切应变模量,MPa;

[0127] E—岩石的杨氏模量,MPa;

[0128] μ —泊松比,无因次;

[0129] a—天然裂缝长度,m;

[0130] i—第 i 个单元体;

[0131] j—第 j 个单元体。

[0132] 联立求解150个单元体的应力—滑移量方程,即可得到每个单元体的剪切滑移量,最终得出天然裂缝的剪切滑移量(图1)。

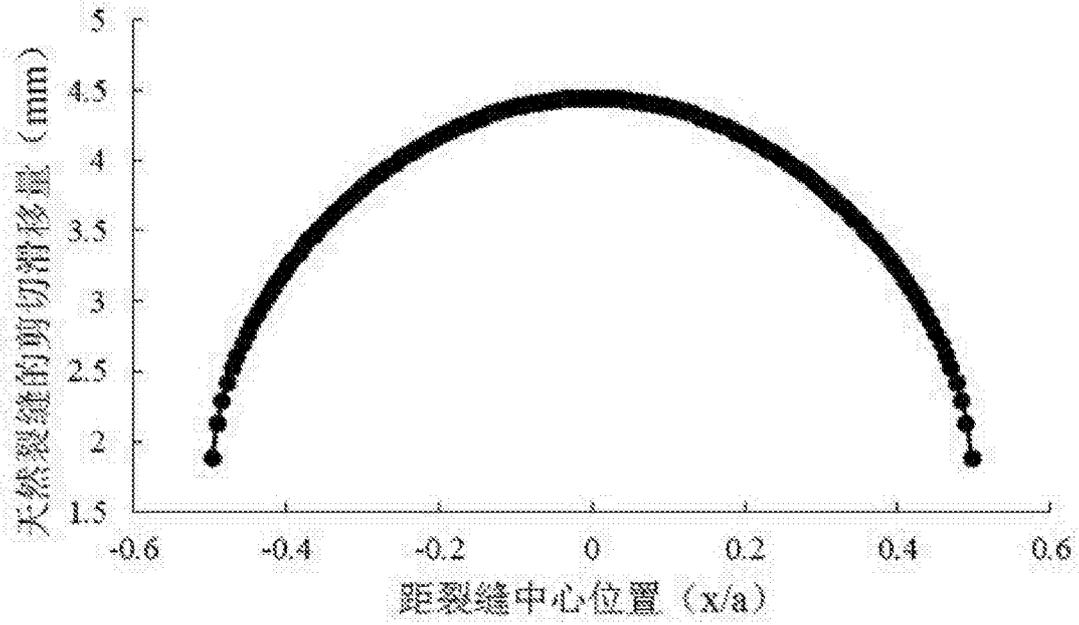


图1