



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 105157588 A

(43) 申请公布日 2015. 12. 16

(21) 申请号 201510557390. 7

(22) 申请日 2015. 09. 05

(71) 申请人 辽宁工程技术大学

地址 123000 辽宁省阜新市细河区中华路  
47 号

(72) 发明人 王学滨 张楠 杜亚志

(51) Int. Cl.

G01B 11/14(2006. 01)

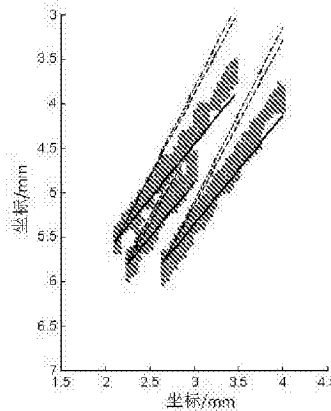
权利要求书2页 说明书8页 附图10页

(54) 发明名称

一种应变局部化带间距演变规律的多维同步  
优化测量方法

(57) 摘要

本发明提供了一种应变局部化带间距随应力或应变演变规律的观测方法,包括:利用拍摄设备获取试样在加载过程中的数字图像;利用亚像素数字图像相关方法和双三次样条插值方法获取光滑性较好的应变场;获取每条被测应变局部化带的应变数据;设置迭代的初值,任一初值的维数比应变局部化带的数目多 1,利用群智能算法,通过不断同步迭代,逐渐缩小各条应变局部化带上的数据与试探解答之间的偏差,最终获得唯一的应变局部化带角度和各自的不同截距;利用两条平行线之间的距离公式,计算任意两条相邻应变局部化带的间距。本发明的优点为:能够保证测量结果的准确性和唯一性,能够获得应变局部化带间距的演变规律,能够实现自动化、批量、高效率测量。



1. 一种应变局部化带间距演变规律的多维同步优化测量方法,该方法具体步骤如下:

步骤 1:利用拍摄设备获取在加载条件下试样一个包含散斑表面的数字图像;

步骤 2:利用亚像素数字图像相关方法,获取试样表面的变形场:水平线应变  $\varepsilon_x$ 、垂直线应变  $\varepsilon_y$ 、剪切应变  $\gamma_{xy}$ 及最大剪切应变  $\gamma_{max}$ ;

步骤 3:设置计算区域,获取每条应变局部化带中央及其附近的应变数据,该计算区域可以是包含多条应变局部化带的 1 个四边形区域,也可是包含 1 条应变局部化带的四边形区域的集合;

对于计算区域是包含多条应变局部化带的 1 个四边形区域的情形:

首先,设置包含多条应变局部化带的 1 个四边形计算区域;

之后,根据应变场,确定走向一致的应变局部化带的数目  $m$ ;

之后,利用插值方法,获取计算区域内光滑性较好的各种应变场;

最后,利用粗估的被测应变局部化带角度和宽度,设置多个狭长四边形区域,每个狭长四边形区域仅包含 1 条应变局部化带,获取每条应变局部化带中央及其附近的应变数据;

对于计算区域是包含 1 条应变局部化带的四边形区域的集合的情形:

首先,根据应变场,确定走向一致的应变局部化带的数目  $m$ ;

之后,利用粗估的被测应变局部化带角度和宽度,设置多个狭长四边形区域作为计算区域,每个狭长四边形区域仅包含 1 条应变局部化带;

之后,利用插值方法,获取计算区域内光滑性较好的各种应变场;

最后,获取每条应变局部化带中央及其附近的应变数据;

步骤 4:对于每条应变局部化带,设置  $n$  个迭代初值和有关迭代参数,对于任一初值,即一系列平行线段,初值的维数为  $m+1$ ,其中包括 1 个斜率和  $m$  个截距,利用群智能算法,通过不断同步迭代,获取各条线段共同的斜率和各自不同的截距;

步骤 5:利用平行线之间距离公式,计算任意两条相邻应变局部化带的间距。

2. 根据权利要求 1 所述的一种应变局部化带间距演变规律的多维同步优化测量方法,其特征在于,将应变局部化带间距测量问题归结于多维同步优化问题,通过不断同步迭代,逐渐缩小应变局部化带数据与试探解答之间的偏差,直到满足迭代结束条件。

所述同步迭代是指试探解答向真实解答逼近的过程,在此过程中, $m$  条线段与  $m$  条应变局部化带中央及其附近的应变数据之间的偏差同步逐渐缩小,上述迭代或寻优过程可归结于使目标函数  $J$  达到最小,即

$$\min(J) = \min\{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{c_i} [s_{ij} - f_{ij}(k_l, b_{il})]^2\} \quad (1)$$

其中,下标  $l$  代表  $n$  个迭代初值中的任一个,  $l = 1 \sim n$ ;  $c_i$  代表第  $i$  条应变局部化带的数据数目,通常,不同应变局部化带的数据数目不同,  $i = 1 \sim m$ ;  $s_{ij}$  代表第  $i$  条应变局部化带的第  $j$  个数据的纵坐标,  $j = 1 \sim c_i$ ,  $s_{ij} = s_{ij}(x_{ij})$ ,  $x_{ij}$  为该数据的横坐标;  $f_{ij}$  代表与第  $i$  条应变局部化带逼近的线段在第  $j$  个数据处的纵坐标,由于  $f_{ij}$  是线性函数,所以,  $f_{ij} = (k_l, b_{il}) = k_l x_{ij} + b_{il}$ ,  $k_l$  是  $l$  个初值(各线段)的共同斜率,  $b_{il}$  是  $l$  个初值的不同截距,  $s_{ij} - f_{ij}$  代表  $l$  个数据点与  $l$  个试探解答中  $l$  条线段之间的偏差;欲获取所有数据点与一个试探解答中所有线段的偏差的平方,需要进行两次求和计算:第 1 次,对  $l$  条应变局部化带中的所有数据的偏差的平方求和,第 2 次,对各条应变局部化带的偏差的平方求和;使上述

偏差的平方达到最小的试探解答记为  $\Omega_*$ ,  $\Omega_* = \{k_*, b_{1*}, b_{2*}, \dots, b_{m*}\}$ , 其具有唯一性, 即为所求的真实解答。

3. 根据权利要求 1 所述的一种应变局部化带间距演变规律的多维同步优化测量方法, 其特征在于, 对于任一个试探解答, 其维数比应变局部化带数目  $m$  多 1, 其中包含各条线段共同的斜率和各自不同的截距。

4. 根据权利要求 1 所述的一种应变局部化带间距演变规律的多维同步优化测量方法, 其特征在于, 利用群智能算法的全局并行搜索能力, 对试探解答的各条平行线段的不同截距和共同的斜率同步搜索, 兼顾了所有应变局部化带的的数据, 确保了所得结果的正确性和唯一性。

5. 根据权利要求 1 所述的一种应变局部化带间距演变规律的多维同步优化测量方法, 其特征在于, 利用插值方法对所述计算区域内的由亚像素数字图像相关方法获得的数据量有限的应变场进行插值, 以获取光滑的应变场, 根据应变场的特点, 获取被测应变局部化带的的数据;

所述应变场的特点包括: (1) 最大剪切应变场、线应变场或剪切应变场的统计信息; (2) 各条应变局部化带的范围及角度的估计值, 上述估计值由直接观察或凭借经验确定。

6. 根据权利要求 1 所述的一种应变局部化带间距演变规律的多维同步优化测量方法, 其特征在于, 任意两条相邻应变局部化带的间距  $d_i$  的计算公式为

$$d_i = |b_{(i+1)*} - b_{i*}| \sin \theta_* = |b_{(i+1)*} - b_{i*}| \sin[\arctan(k_*)], i = 1 \sim (m-1) \quad (2)$$

其中, 参数的下标 \* 代表使目标函数达到最小的参数, 亦可采用点到直线距离公式计算两条相邻应变局部化带的间距, 但要求点在一条直线上。

7. 根据权利要求 1 所述的一种应变局部化带间距演变规律的多维同步优化测量方法, 其特征在于, 被测应变局部化带是走向一致的, 即其角度基本相同。

8. 根据权利要求 1 所述的一种应变局部化带间距演变规律的多维同步优化测量方法, 其特征在于, 通过计算在不同应力或应变条件下试样中的相邻应变局部化带之间的间距, 即可获得应变局部化带间距随应力或应变的演变规律。

## 一种应变局部化带间距演变规律的多维同步优化测量方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及一种应变局部化带间距测量技术,属于岩土力学、岩土工程、实验力学、地质力学、工程材料力学性能测试等领域。

### 背景技术

[0002] 应变局部化是在材料破坏之前观察到的应变集中于狭窄的带状区域内的现象,应变局部化按载荷类型可以划分为剪切应变局部化、拉伸应变局部化和压缩应变局部化。应变局部化现象可以在不同的层次上被观察到,例如,晶粒尺度上的网状滑移线、工程尺度上的交叉的小断层和地壳尺度上的网状地质构造和地震带都可归结于应变局部化现象(王学滨,潘一山.地质灾害中的应变局部化现象.地质灾害与环境保护,2001,12(4):1-5;王学滨,赵扬锋,代树红等.地震块体模型的共轭剪切破裂带数值模拟.防灾减灾工程学报,2004,24(2):119-125)。应变局部化现象往往以网络形式存在,这样,应变局部化带间距的测量就成为应变局部化现象研究中不可回避的重要问题。

[0003] 目前,应变局部化带间距的测量主要采用两种方法:采用尺子和数字图像技术测量肉眼可见的裂纹面之间的间距,以此作为应变局部化带的间距。实际上,这种测量方法的误差很大,测量结果因人而异,工作量大,难于实现自动化、批量、高效率测量,所获取的数据量有限,而且,测量的是裂纹面的间距,并非应变局部化带的间距。应变局部化带在启动及发展过程中,由于变形阶段的不同和应力场的调整,应变局部化的方向及位置将发生适当的变化。没有任何理论证明,应变局部化带间距等同于裂纹面间距。欲准确测量应变局部化带间距,必须着眼于应变场,在裂纹出现之前,应变场已变得不均匀,这种变化仅凭肉眼一般不容易观测到,不断发展的数字图像相关方法(王学滨,杜亚志,潘一山.基于DIC粗-细搜索方法的单轴压缩砂样的应变分布及应变梯度的实验研究.岩土工程学报,2012,34(11):2050-2057;王学滨,杜亚志,潘一山.考虑一阶和二阶位移梯度的数字图像相关方法在剪切带测量中的比较.工程力学,2013,30(7):282-287;王学滨,杜亚志,潘一山.单轴压缩湿砂样局部及整体体积应变的数字图像相关方法观测.岩土工程学报,2014,36(9):1648-1656)为应变场的精确测量提供了便利条件。数字图像相关方法是一种光测力学方法,具有测量设备简单、对测量环境要求低、测量精度高的优点。

[0004] 本发明提出采用数字图像相关方法测量应变局部化带的间距。以亚像素数字图像相关方法和双三次样条插值方法获得的光滑性较好的应变场作为依据,将唯一应变局部化带间距的测量问题归结于一个多维同步优化问题,利用群智能算法,通过不断同步迭代,逐渐缩小各条应变局部化带数据与试探解答(各线段)之间的偏差,最终实现兼顾所有数据的唯一的应变局部化带角度和应变局部化带间距的测量。

### 发明内容

[0005] 为了解决现有的应变局部化带间距测量方法的精度低、效率低、获取数据量有限及所得结果不唯一的问题,本发明提供了一种基于数字图像相关方法的应变局部化带间距

演变规律的多维同步优化测量方法,提高了测量的效率、精度,可以获取丰富的数据量,所得结果唯一。

[0006] 本发明的特征在于,包括如下步骤:

[0007] 步骤 1:利用拍摄设备(数码相机或 CCD 摄像头)获取在加载条件下试样一个包含散斑表面的数字图像;

[0008] 步骤 2:利用亚像素数字图像相关方法,获取试样表面的变形场:水平线应变  $\varepsilon_x$ 、垂直线应变  $\varepsilon_y$ 、剪切应变  $\gamma_{xy}$  及最大剪切应变  $\gamma_{max}$ ;

[0009] 步骤 3:设置计算区域,获取每条应变局部化带中央及其附近的应变数据,该计算区域可以是包含多条应变局部化带的 1 个四边形区域,也可是包含 1 条应变局部化带的四边形区域的集合;

[0010] 对于计算区域是包含多条应变局部化带的 1 个四边形区域的情形:

[0011] 首先,设置包含多条应变局部化带的 1 个四边形计算区域;

[0012] 之后,根据应变场,确定走向一致的应变局部化带的数目  $m$ ;

[0013] 之后,利用插值方法,获取计算区域内光滑性较好的各种应变场;

[0014] 最后,利用粗估的被测应变局部化带角度和宽度,设置多个狭长四边形区域,每个狭长四边形区域仅包含 1 条应变局部化带,获取每条应变局部化带中央及其附近的应变数据;

[0015] 对于计算区域是包含 1 条应变局部化带的四边形区域的集合的情形:

[0016] 首先,根据应变场,确定走向一致的应变局部化带的数目  $m$ ;

[0017] 之后,利用粗估的被测应变局部化带角度和宽度,设置多个狭长四边形区域作为计算区域,每个狭长四边形区域仅包含 1 条应变局部化带;

[0018] 之后,利用插值方法,获取计算区域内光滑性较好的各种应变场;

[0019] 最后,获取每条应变局部化带中央及其附近的应变数据;

[0020] 步骤 4:对于每条应变局部化带,设置  $n$  个迭代初值和有关的迭代参数,对于任一初值(一系列平行线段),初值的维数为  $m+1$ ,其中包括 1 个斜率和  $m$  个截距,利用群智能算法,通过不断同步迭代,获取各条线段共同的斜率和各自不同的截距;

[0021] 步骤 5:利用平行线之间距离公式,计算任意两条相邻应变局部化带的间距。

[0022] 进一步地,其中,所述获取在加载条件下试样一个包含散斑表面的数字图像进一步为:若试样表面的天然纹理可作为散斑场,则不必人工制作散斑场,否则,利用油漆、颜料、墨水等喷涂人工散斑场,利用试验机或加载装置对试样进行加载,同时,利用拍摄设备记录散斑场的图像。

[0023] 进一步地,其中,所述利用亚像素数字图像相关方法,获取试样表面的变形场进一步为:选择若干记录的图像,设置有关的计算参数和计算模式,使用亚像素数字图像相关方法计算图像的位移场和应变场,应变场通过对位移场进行中心差分获得,最大剪切应变  $\gamma_{max}$  由  $\varepsilon_x$ 、 $\varepsilon_y$  及  $\gamma_{xy}$  获得

$$[0024] \quad \gamma_{max} = \sqrt{(\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + \gamma_{xy}^2} \quad (1)$$

[0025] 进一步地,其中,所述走向一致的应变局部化带是指应变局部化带网络中其角度基本相同的若干应变局部化带的集合。

[0026] 进一步地,其中,所述获取每条应变局部化带中央及其附近的应变数据进一步为:设置临界应变参数,将超过该参数的数据作为被测应变局部化带的带数据。

[0027] 进一步地,其中,所述狭长四边形区域的宽度方向尺寸可取为材料平均颗粒直径的 20 ~ 60 倍,即应变局部化带宽度的 1 ~ 3 倍;所述临界应变参数由经验确定,一般可取为计算区域内  $\gamma_{\max}$  最大值的 60% 以上。

[0028] 进一步地,其中,所述迭代初值包括各条应变局部化带所对应线段的共同斜率的初值和不同截距的初值,故初值的维数比应变局部化带的数目  $m$  多 1,设任一迭代初值为  $\Omega_i = \{k_i, b_{1i}, b_{2i}, \dots, b_{mi}\}$ ,其中,  $k_i$  为共同斜率的初值,  $\{b_{1i}, b_{2i}, \dots, b_{mi}\}$  为不同截距的初值。

[0029] 进一步地,其中,所述群智能算法可在粒子群优化算法、遗传算法、差分进化算法等算法中进行选择。

[0030] 进一步地,其中,所述各条线段共同的斜率和各自不同的截距是指由这些参数确定的  $m$  条线段与各条应变局部化带中央及其附近的应变数据最为接近,即偏差达到最小

$$[0031] \quad \min(J) = \min\{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{c_i} [s_{ij} - f_{ij}(k_i, b_{il})]^2\} \quad (2)$$

[0032] 其中,下标  $l$  代表  $n$  个迭代初值中的任一个,  $l = 1 \sim n$ ;  $c_i$  代表第  $i$  条应变局部化带的带数据数目,通常,不同应变局部化带的带数据数目不同,  $i = 1 \sim m$ ;  $s_{ij}$  代表第  $i$  条应变局部化带的第  $j$  个数据的纵坐标,  $i = 1 \sim m$ ,  $j = 1 \sim c_i$ ,  $s_{ij} = s_{ij}(x_{ij})$ ,  $x_{ij}$  为该数据的横坐标;  $f_{ij}$  代表与第  $i$  条应变局部化带逼近的线段在第  $j$  个数据处的纵坐标,由于  $f_{ij}$  是线性函数,所以,  $f_{ij} = (k_l, b_{il}) = k_l x_{ij} + b_{il}$ ,  $k_l$  是  $l$  个初值(各线段)的共同斜率,  $b_{il}$  是  $l$  个初值的不同截距,  $(s_{ij} - f_{ij})^2$  代表 1 个应变数据点与 1 条线段之间的偏差的平方,对一条应变局部化带上的所有数据  $c_i$  求和,代表了一条应变局部化带的应变数据与 1 条线段之间的偏差的平方,再对每条应变局部化带求和,代表各条应变局部化带的应变数据与各条线段之间的偏差的平方,通过不断同步迭代,使其达到最小的向量  $\Omega_* = \{k_*, b_{1*}, b_{2*}, \dots, b_{m*}\}$  即为所述的唯一且最佳结果。

[0033] 进一步地,其中,所述同步迭代是迭代初值或试探解答不断更新的过程,对于不同的群智能算法,试探解答的更新原理并不相同,但是基本上都考虑了不同试探解答之间的信息共享、相互学习和影响以及优胜劣汰和适者生存等策略,迭代结束的条件包括两种:1) 迭代次数达到最大代数;2) 迭代结果已趋于稳定(尽管迭代次数未达到最大代数)。

[0034] 进一步地,其中,所述迭代参数包括:最大代数、迭代初值的数目、迭代结束的阈值条件以及不同群智能算法所要求的迭代参数,例如,对于粒子群优化算法,需要粒子飞行的最大速度、学习因子、惯性常数等参数。

[0035] 进一步地,其中,所述任意两条相邻应变局部化带的间距  $d_i$  公式为

$$[0036] \quad d_i = |b_{(i+1)*} - b_{i*}| \sin \theta_* = |b_{(i+1)*} - b_{i*}| \sin[\arctan(k_*)], i = 1 \sim (m-1) \quad (3)$$

[0037] 本发明所述的一种基于数字图像相关方法的应变局部化带间距演变规律的多维同步优化测量方法,能够实现应变局部化带间距的自动化、快速、准确测量,获得的信息丰富,能保证测量结果的唯一性。

## 附图说明

[0038] 图 1 为一种应变局部化带间距演变规律的多维同步优化测量方法的流程图;

[0039] 图 2 为在加载条件下数字图像采集装置的示意图 ; 图中, 1—试样, 2—包含散斑的表面, 3—光源, 4—拍摄设备, 5—计算机 ;

[0040] 图 3 为自主开发的基于粒子群优化和 Newton-Raphson 迭代方法的数字图像相关方法程序界面图 ;

[0041] 图 4 为多维同步优化过程的示意图, 其中图 4-a 为设置计算区域 ; 图 4-b 为确定走向一致的应变局部化带的范围 ; 图 4-c 为获取每条应变局部化带中央及其附近的应变数据 ; 图 4-d 为设置迭代初值和迭代参数 ; 图 4-e 为迭代的最终结果 ( 仅给出了使目标函数最小的真实解答 ) ; 图中, 6—计算区域, 7—应变局部化带, 7-1—走向一致的应变局部化带 ( 被测应变局部化带 ), 7-2—走向一致的应变局部化带, 8—狭长四边形区域, 9—任一数据点, 10—某一迭代初值 ( 这样的迭代初值有  $n$  个 ), 11—唯一的真实解答 ;

[0042] 图 5 为基于粒子群优化算法的多维同步优化过程的流程图 ;

[0043] 图 6 为计算任意两条相邻应变局部化带的间距的原理图 ;

[0044] 图 7 为不同纵向应变  $\varepsilon_a$  时的单向压缩砂样的最大剪切应变  $\gamma_{\max}$  的分布图, 其中, 图 7-a 为  $\varepsilon_a = 0.08$  时的结果图 ; 图 7-b 为  $\varepsilon_a = 0.09$  时的结果图 ; 图 7-c 为  $\varepsilon_a = 0.11$  时的结果图 ; 图 7-d 为  $\varepsilon_a = 0.13$  时的结果图 ; 图 7-e 为  $\varepsilon_a = 0.14$  时的结果图 ; 图 7-f 为  $\varepsilon_a = 0.15$  时的结果图 ; 图 7-g 为  $\varepsilon_a = 0.16$  时的结果图 ; 图中, 12—限制 3 条应变局部化带的 3 个四边形区域 ;

[0045] 图 8 为  $\varepsilon_a = 0.16$  时走向一致的 3 条应变局部化带的数据、迭代初值及多维同步优化过程图, 其中, 图 8-a 为迭代代数  $N = 1$  时的结果图 ; 图 8-b 为迭代代数  $N = 10$  时的结果图 ; 图 8-c 为迭代代数  $N = 30$  时的结果图 ; 图 8-d 为迭代代数  $N = 100$  时的结果图 ; 图中, 13-15—迭代初值 ; 16—应变局部化带的数据 ; 17—真实解答 ; 17-1—针对第 1 条带的真实解答 ; 17-2—针对第 2 条带的真实解答 ; 17-3—针对第 3 条带的真实解答 ;

[0046] 图 9 为  $\varepsilon_a = 0.16$  且不同迭代代数时目标函数  $J$  的演化图 ;

[0047] 图 10 为不同纵向应变  $\varepsilon_a$  时被测应变局部化带的间距的演化图。

## 具体实施方式

[0048] 以下结合附图对该方法的具体实施方式进行说明。

[0049] 本发明所述的一种应变局部化带间距演变规律的多维同步优化测量方法, 其流程图如图 1 所示, 包括如下步骤 :

[0050] 步骤 1 : 如图 2 所示, 利用拍摄设备 4 ( 数码相机或 CCD 摄像头 ) 获取在加载条件下试样 1 一个包含散斑的表面 2 的数字图像, 光源 3 设置于拍摄设备 4 的前方, 拍摄的图像保存在计算机 5 的硬盘中 ;

[0051] 这一步骤实施具体如下 : 首先, 在试样 1 一个表面制作人工散斑场, 若试样表面的天然纹理可达到作为散斑场的条件, 则不必人工制作散斑场 ; 然后, 利用试验机或加载装置对试样 1 进行加载, 与此同时, 利用拍摄设备 4 记录散斑场的图像。

[0052] 所述人工散斑场是指在试样表面采用油漆、颜料、墨水等喷涂的随机斑点状图案。

[0053] 步骤 2 : 利用亚像素数字图像相关方法 ( 图 3 ), 获取试样表面的变形场 : 水平线应变  $\varepsilon_x$ 、垂直线应变  $\varepsilon_y$ 、剪切应变  $\gamma_{xy}$  及最大剪切应变  $\gamma_{\max}$  ;

[0054] 这一步骤具体实施如下 : 首先, 从记录的大量图像中, 选择若干典型的用于应变场

计算;之后,设置有关的计算参数和计算模式,使用亚像素数字图像相关方法计算图像的位移场;之后,通过对位移场进行中心差分获得应变场;最后,根据水平线应变、垂直线应变和面内剪切应变计算最大剪切应变。

[0055] 所述计算参数包括:子区尺寸、测点间距、测点数目、粒子数目及粒子最大飞行速度等。

[0056] 所述计算模式包括:增量模式和全量模式,所谓增量模式是指以前一张图像作为变形前图像,所得的位移场和应变场是增量;所谓的全量模式是指以第一张图像作为变形前图像,所得的位移场和应变场是全量。

[0057] 所述亚像素数字图像相关方法可选择基于粒子群优化及 Newton-Raphson 迭代方法的数字图像相关方法(杜亚志,王学滨.基于 Newton-Raphson 迭代与 PSO 算法的数字图像相关方法.计算机工程与应用,2012,48(34):184-189),该方法可以避免传统 Newton-Raphson 迭代方法易于陷入局部最优的弊端,也可以避免迭代的初值不容易确定的弊端。尽管该方法可以同时位移场和应变场进行相关搜索,但考虑到应变场的精度一般不高,因而弃用应变场的数据,通常采用对位移场进行中心差分获得新的应变场。

[0058] 所述最大剪切应变场由 3 种应变场获得,该最大剪切应变场总大于零,随着变形的继续,应变局部化带内部的变形愈加明显,而带外的变形增加较慢,因而可以很好地表征应变局部化过程。

[0059] 步骤 3:设置计算区域,获取每条应变局部化带中央及其附近的应变数据;

[0060] 这一步骤实施具体如下:首先,通过观察应变场,设置一个包含多条应变局部化带 7 的计算区域(这里,以包含多条应变局部化带的 1 个四边形区域作为计算区域 6,如图 4-a 所示);之后,根据应变场,确定走向一致的应变局部化带 7 的数目  $m$ (图 4-b);之后,对上述计算区域的数据量有限的应变场进行双三次样条插值,以提高应变场的数据量和光滑性,不需对整个试样进行,这可降低插值工作量,提高插值的效率;最后,如图 4-b 和图 4-c 所示,利用粗估的被测应变局部化带 7-1 的角度和宽度,剔除被测应变局部化带 7-1 之外的数据,获取每条被测应变局部化带 7-1 中央及其附近的应变数据。

[0061] 所述走向一致的应变局部化带是指应变局部化带网络中其角度基本相同的若干局部化带的集合,通常,应变局部化带网络中的应变局部化带 7 是以共轭的方式存在的,即两簇,其中的任一簇即为走向一致的应变局部化带 7-1 或 7-2,此处,以走向一致的应变局部化带 7-1 作为被测应变局部化带。

[0062] 所述获取每条被测应变局部化带中央及其附近的应变数据进一步为:首先,设置适当的临界应变参数,将超过该参数的数据作为被测应变局部化带 7-1 的数据;之后,根据经验,确定各条被测应变局部化带 7-1 的范围,舍弃在这些范围之外的数据。

[0063] 所述各条被测应变局部化带的范围由 1 个狭长四边形区域 8 限定,狭长四边形区域 8 均位于计算区域 6 之内,狭长四边形区域 8 的两个较长的边平行,其角度凭借经验设置,对于岩土材料,剪切应变局部化带的方向与最大主应力( $\sigma_3$ )方向之间的角度一般在  $55^\circ \sim 80^\circ$ ;狭长四边形区域 8 的两个较长的边的距离,即其宽度方向的尺寸可取为剪切应变局部化带宽度的 1~3 倍,即材料平均颗粒直径的 20~60 倍。

[0064] 所述临界应变参数可取为计算区域 6 内  $\gamma_{\max}$  的最大值的 60% 以上。

[0065] 步骤 4:如图 4-d 所示,对于每条被测应变局部化带 7-1,设置  $n$  个迭代初值和有关



迭代参数,对于某一迭代初值 10,即一系列平行线段,初值的维数为  $m+1$ ,其中包括 1 个斜率和  $m$  个截距,利用群智能算法,通过不断同步迭代,获取各条线段共同的斜率和各自不同的截距。

[0066] 所述迭代初值是指计算区域 6 之内的一系列线段,每条线段针对 1 条应变局部化带 7,迭代初值由这些线段的斜率和截距完全确定,坐标原点可取在计算区域 6 的中心处;对于某一迭代初值 10,其包含的线段彼此平行,这样,初值的维数将比应变局部化带的数目  $m$  多 1;对于不同的初值,通常,其包含的全部线段并不满足相互平行的要求。

[0067] 所述任一迭代初值设为  $\Omega_i = \{k_i, b_{1i}, b_{2i}, \dots, b_{mi}\}$ ,其中,  $i = 1 \sim n$ ,  $n$  为迭代初值的数目;应当指出,该迭代初值的数目不等于初值的维数,维数和应变局部化带 7 的数目有关,而初值的数目与问题的难易程度有关,对于容易求解的优化问题,初值的数目不需太多; $k_i$  为任一迭代初值的共同斜率,  $\{b_{1i}, b_{2i}, \dots, b_{mi}\}$  为任一迭代初值的不同截距;在迭代过程中,迭代初值将被试探解答更新,但试探解答仍满足迭代初值的特点:对于任一个试探解答,其包含的线段彼此平行。

[0068] 所述群智能算法包括粒子群优化算法、遗传算法、差分进化算法等。不同的群智能算法有不同的表现和起源,这决定了试探解答不同的更新原理,但这些群智能算法具有下列共性:具有较强的全局并行搜索能力,这根源于考虑了不同试探解答之间的信息共享、相互学习和影响以及优胜劣汰和适者生存等策略。

[0069] 所述同步迭代过程是指试探解答不断向真实解答逼近的过程,在此过程中, $m$  条线段与  $m$  条应变局部化带中央及附近的应变数据之间的偏差同步逐渐缩小,上述迭代或寻优过程可归结于使目标函数  $J$  达到最小,即

$$[0070] \quad \min(J) = \min\{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{c_i} [s_{ij} - f_{ij}(k_i, b_{il})]^2\} \quad (1)$$

[0071] 其中,下标  $l$  代表  $n$  个迭代初值中的任一个,  $l = 1 \sim n$ ;  $c_i$  代表第  $i$  条应变局部化带的数据数目,通常,不同应变局部化带的数据数目不同,  $i = 1 \sim m$ ;  $s_{ij}$  代表第  $i$  条应变局部化带的第  $j$  个数据的纵坐标,  $i = 1 \sim m$ ,  $j = 1 \sim c_i$ ,  $s_{ij} = s_{ij}(x_{ij})$ ,  $x_{ij}$  为该数据的横坐标;  $f_{ij}$  代表与第  $i$  条应变局部化带逼近的线段在第  $j$  个数据处的纵坐标,由于  $f_{ij}$  是线性函数,所以,  $f_{ij} = (k_l, b_{il}) = k_l x_{ij} + b_{il}$ ,  $k_l$  是  $l$  个初值(各线段)的共同斜率,  $b_{il}$  是  $l$  个初值的不同截距,  $s_{ij} - f_{ij}$  代表  $l$  个数据点 9 与  $l$  个试探解答中  $l$  条线段之间的偏差,欲获取所有数据点 9 与一个试探解答中所有线段的偏差的平方,需要进行两次求和计算:第 1 次,对  $l$  条应变局部化带 7 中的所有数据的偏差的平方求和,第 2 次,对各条应变局部化带 7 的偏差的平方求和;通过不断同步迭代,使上述偏差的平方达到最小的试探解答记为  $\Omega_*$ ,  $\Omega_* = \{k_*, b_{1*}, b_{2*}, \dots, b_{m*}\}$ ,其具有唯一性,即为所求的真实解答 13。如果对各条应变局部化带 7 的数据分别拟合,则无法保证每条应变局部化带 7 的角度相同,这样,对于若干角度稍有差别的若干线段,难于采用 1 个确定的公式获取应变局部化带间距的唯一结果。通过设置迭代初值的维数比应变局部化带的数目  $m$  多 1,而且,其中仅包含一个斜率,这是为了保证应变局部化带 7 间距的迭代结果的唯一性和准确性,其唯一性和准确性得到保障是由于应变局部化带 7 角度的迭代结果兼顾了所有走向一致的应变局部化带 7 中央及其附近的所有数据。

[0072] 所述迭代参数包括:最大代数、迭代初值的数目、迭代结束的阈值条件及不同群智能算法的具体参数。下面,给出采用粒子群优化算法进行迭代的流程图(图 5)和计算步

骤：

[0073] (1) 初始化粒子在计算区域内 6, 根据被测应变局部化带 7 的形态, 给出其中心线角度和截距的估计值, 以此产生  $n$  个粒子的初值, 每个初值的维数为  $m+1$ , 当前粒子为第 1 代粒子,  $N = 1$ ;

[0074] (2) 评价各粒子利用式 (1), 计算各粒子的优劣, 即评价各粒子与应变局部化带数据的偏离程度;

[0075] (3) 寻找任一粒子最优试探解答  $p_{best}$  对于任一粒子, 在所有迭代代数中, 寻找最优试探解答  $p_{id}$ , 即  $p_{best}$ , 下标  $i$  为粒子编号,  $i = 1 \sim n$ ,  $d$  为某一维数,  $d = 1 \sim (m+1)$ ;

[0076] (4) 寻找所有粒子中的最优试探解答  $g_{best}$  在所有迭代代数中, 寻找所有粒子中的最优试探解答  $g_{best}$ ;

[0077] (5) 更新试探解答利用下式更新粒子的飞行速度  $v_{id}^N$  和新位置  $\bar{x}_{id}^N$

$$[0078] \quad v_{id}^{N+1} = wv_{id}^N + c_1r_1(g_{best}^N - \bar{x}_{id}^N) + c_2r_2(p_{id}^N - \bar{x}_{id}^N) \quad (2)$$

$$[0079] \quad w = w_{max} - N \frac{w_{max} - w_{min}}{N_{max}} \quad (3)$$

$$[0080] \quad \bar{x}_{id}^{N+1} = \bar{x}_{id}^N + v_{id}^{N+1} \quad (4)$$

[0081] 其中,  $v_{id}^{N+1}$  代表第  $i$  个粒子在第  $N+1$  代时第  $d$  维上的速度;  $c_1$ 、 $c_2$  为加速常数, 一般取  $c_1 = c_2 = 2$ ;  $r_1$  和  $r_2$  分别为取值在  $[0, 1]$  之间的随机数;  $w$  为惯性常数, 取值随着迭代代数  $N$  的增加而线性递减, 其最大值  $w_{max}$  和最小值  $w_{min}$  分别为 1.4 和 0;  $N_{max}$  为预设的最大迭代次数;  $\bar{x}_{id}^{N+1}$  代表第  $i$  个粒子在第  $N+1$  代时第  $d$  维上的坐标。如果粒子更新后的速度在某维上超出了范围  $[-v_{max}, v_{max}]$ , 则被限定在该维的边界上。如果粒子更新后的坐标超出了搜索域, 也将其限定在边界上。

[0082] (6) 如果满足迭代结束的条件, 即迭代结果趋于稳定, 则停止迭代。否则, 迭代代数增加 1, 回到 (2) 继续计算, 直到满足迭代结束的条件。

[0083] 步骤 5: 如图 6 所示, 利用两条平行线之间距离公式, 计算任意两条相邻应变局部化带 7 的间距  $d_i$ , 其公式容易推得

$$[0084] \quad d_i = |b_{(i+1)*} - b_{i*}| \sin \theta_*, \quad i = 1 \sim (m-1) \quad (5)$$

[0085] 其中,  $\theta_*$  为线段的角度,  $\theta_*$  与  $k_*$  有关, 所以

$$[0086] \quad d_i = |b_{(i+1)*} - b_{i*}| \sin[\arctan(k_*)], \quad i = 1 \sim (m-1) \quad (6)$$

[0087] 当  $i = 1$  时,  $d_1$  代表第 1 条与第 2 条应变局部化带的间距, 以此类推。亦可采用点到直线距离公式计算  $d_i$ , 但要求点在一条直线上。

[0088] 图 7 为不同纵向应变  $\varepsilon_a$  时的单向压缩砂样的最大剪切应变  $\gamma_{max}$  的分布图, 这一结果是采用自主开发的基于粒子群优化和 Newton-Raphson 迭代方法的数字图像相关方法获得的。可以发现, 随着  $\varepsilon_a$  的增加, 应变局部化带越来越清晰, 网络格局越来越明显, 从中选取 3 条走向一致的应变局部化带作为被测对象, 其中, 将限制 3 条应变局部化带的 3 个四边形区域 12 作为计算区域。图 8 为  $\varepsilon_a = 0.16$  时走向一致的 3 条应变局部化带的数据、迭代初值及多维同步优化过程图, 其中粒子数取为 3, 即迭代初值 13-15 共计 3 个, 限于篇幅, 未给出其它  $\varepsilon_a$  时的过程图。可以发现, 随着迭代代数  $N$  的增加, 各试探解答不断向各条应变局部化带的数据 16 靠拢, 最终, 各试探解答趋向同一目标, 即为所求的真实解答 17。图 9

为  $\varepsilon_a = 0.16$  且不同迭代代数时目标函数  $J$  的演化图,可以发现,随着迭代代数  $N$  的增加,目标函数  $J$  不断降低,这说明试探解答不断向真实解答逼近,当  $N = 60 \sim 100$  时迭代结果已趋于稳定。图 10 为不同纵向应变  $\varepsilon_a$  时被测应变局部化带的间距的演化图,可以发现,不同  $\varepsilon_a$  时,应变局部化带之间的距离有所不同,随着  $\varepsilon_a$  的增加,针对第 1 条带的真实解答 17-1 与针对第 2 条带的真实解答 17-2 的间距  $d_1$  有减小的趋势,针对第 2 条带的真实解答 17-2 与针对第 3 条带的真实解答 17-3 的间距  $d_2$  有增大的趋势。

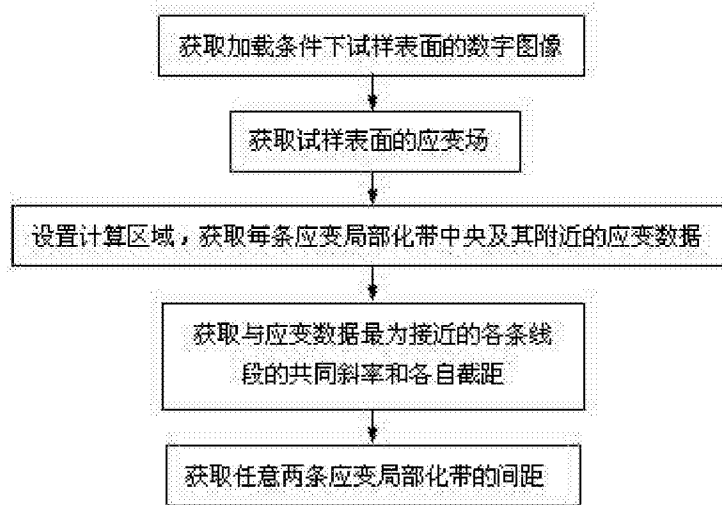


图 1

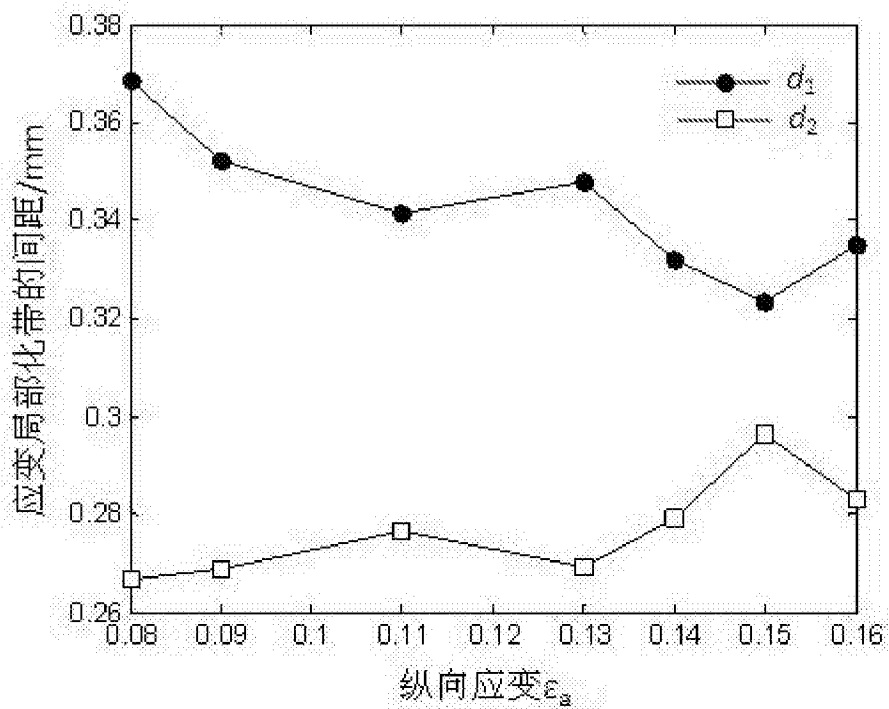


图 2

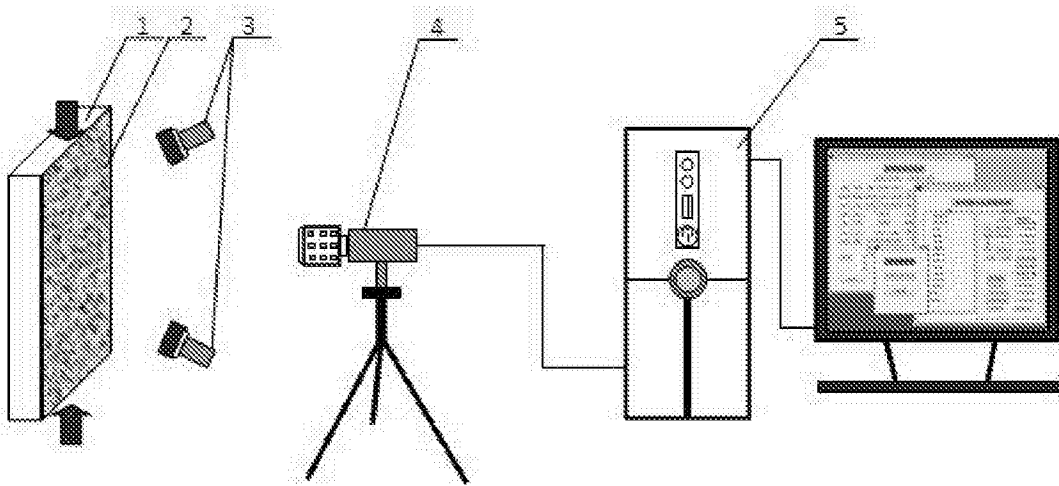


图 3

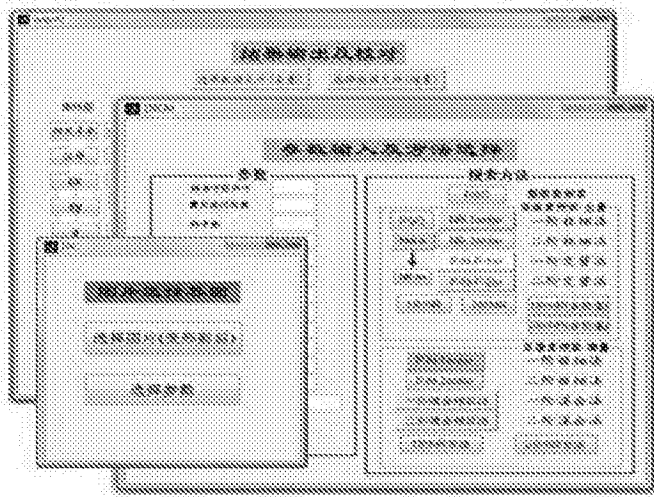


图 4-a

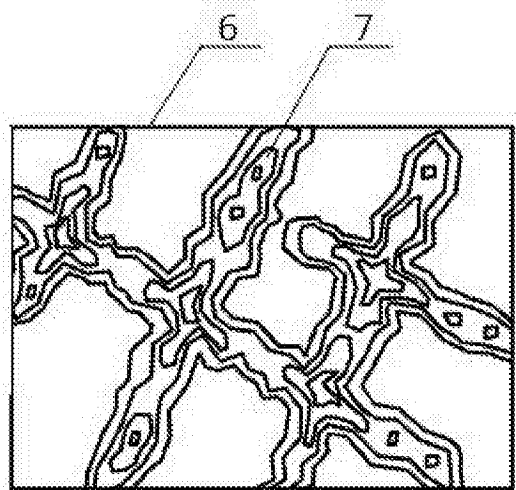


图 4-b

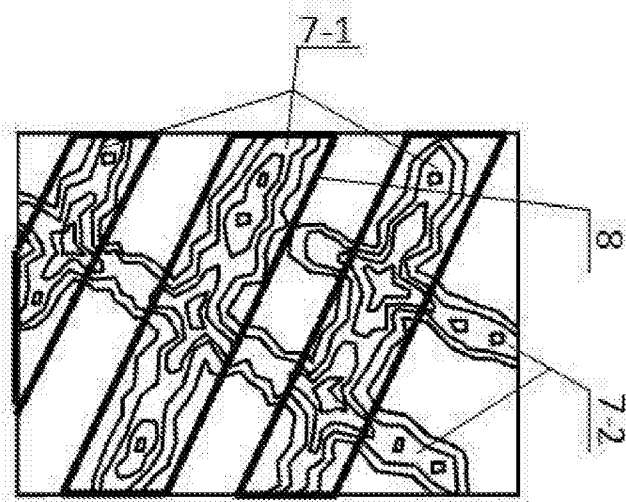


图 4-c

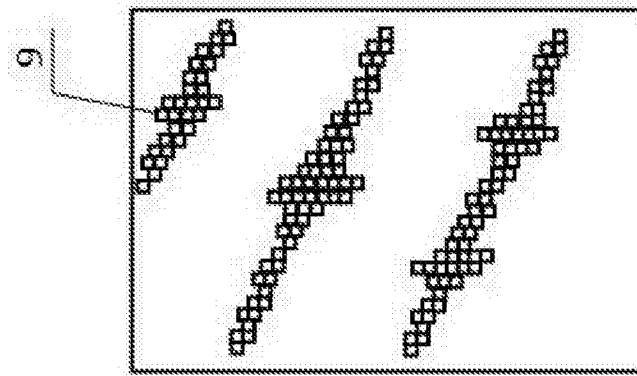


图 4-d

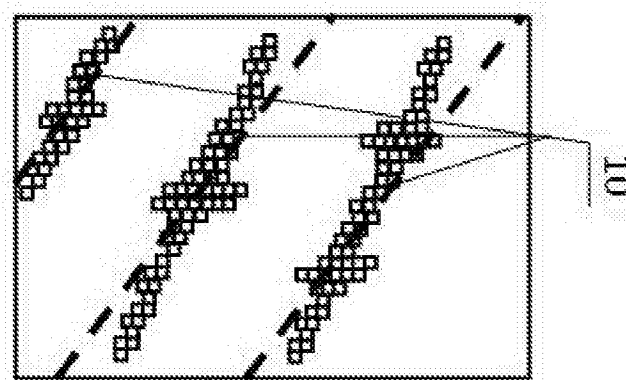


图 4-e

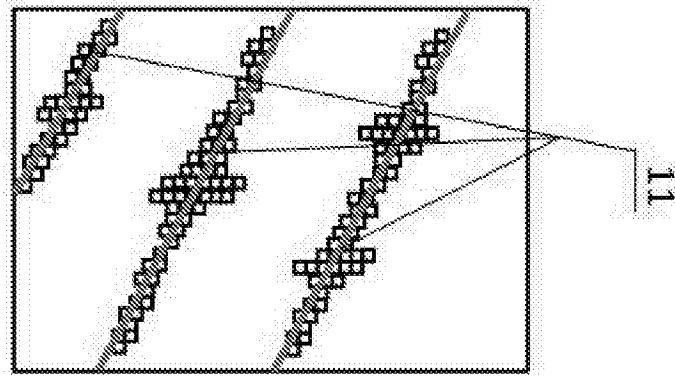


图 5

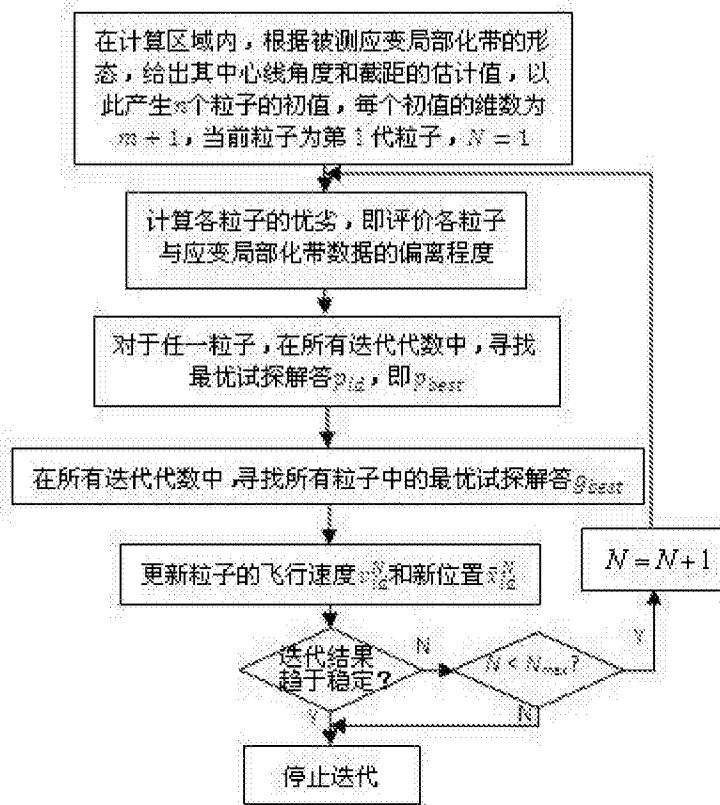


图 6

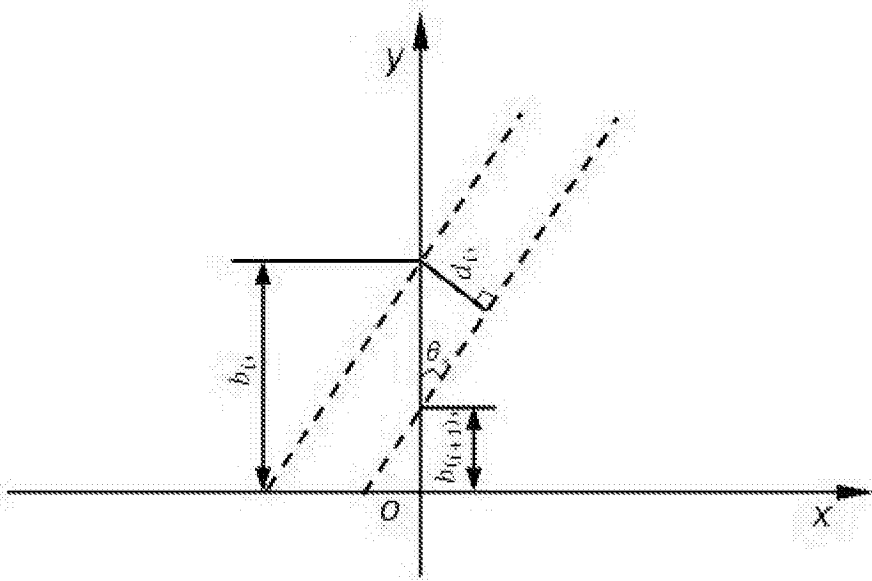


图 7-a

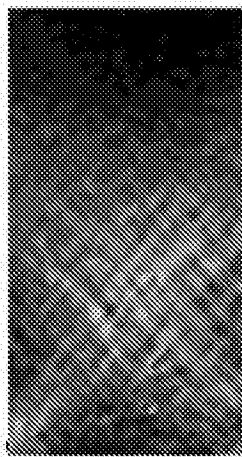


图 7-b

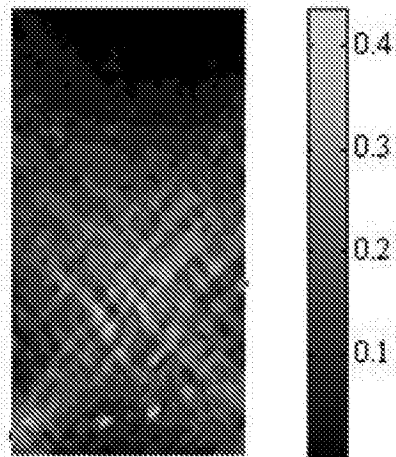


图 7-c



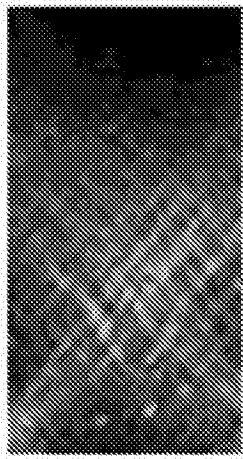


图 7-d

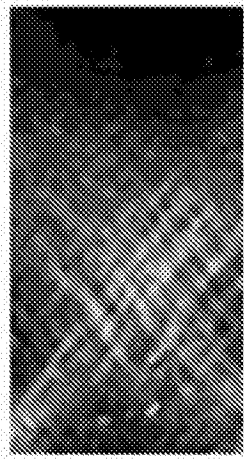
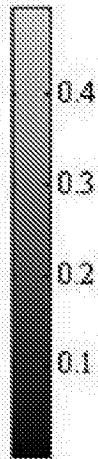


图 7-e

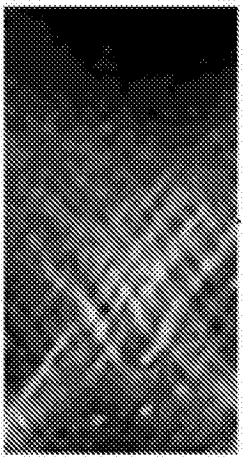
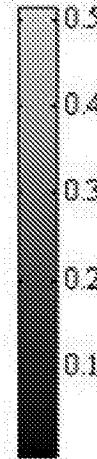


图 7-f

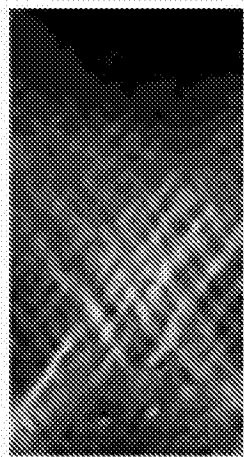


图 7-g

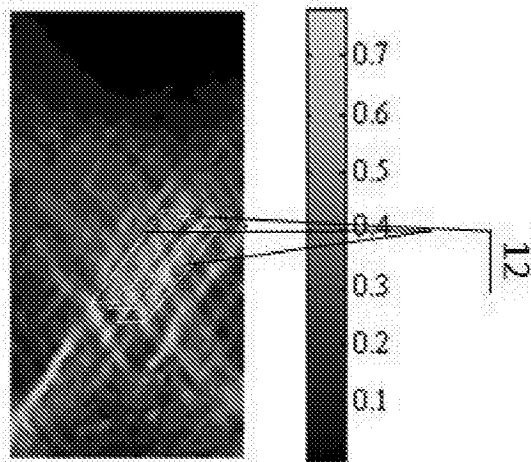
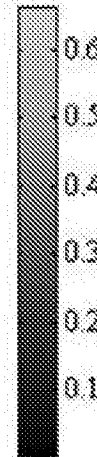


图 8-a

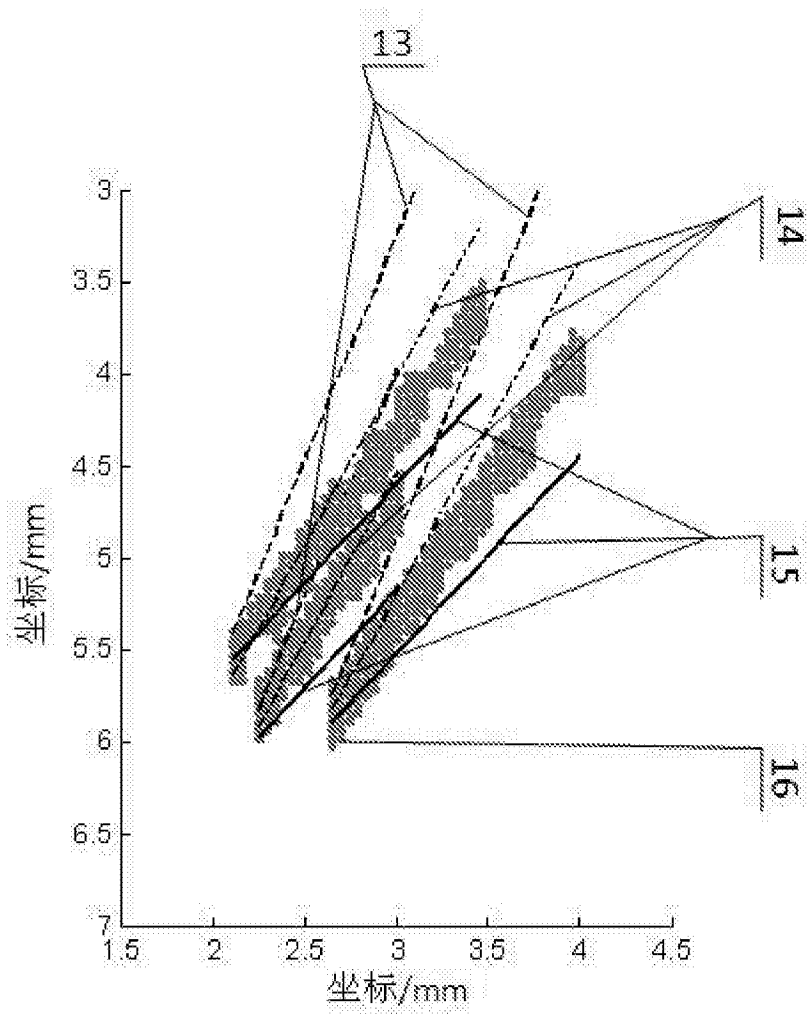


图 8-b

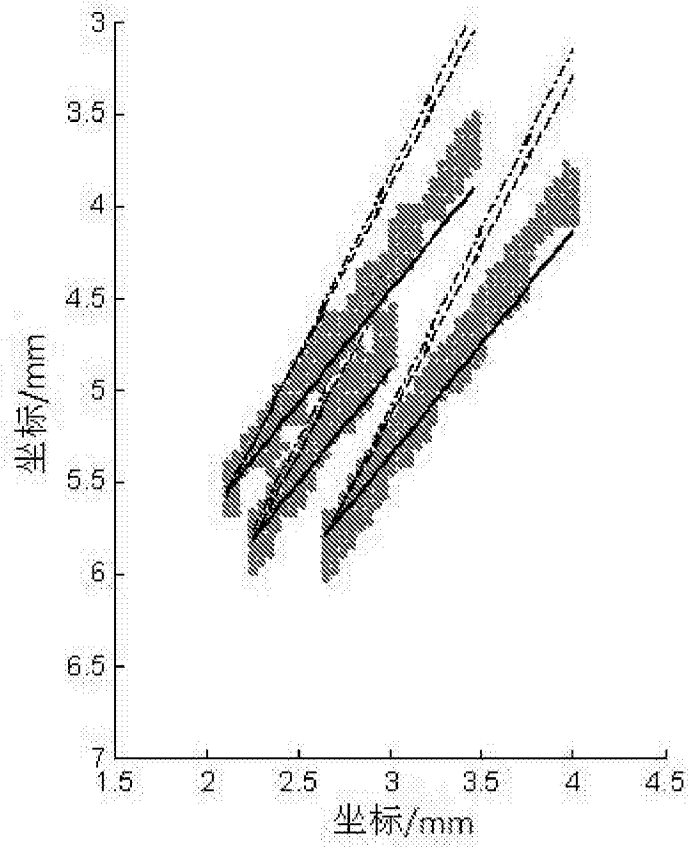


图 8-c

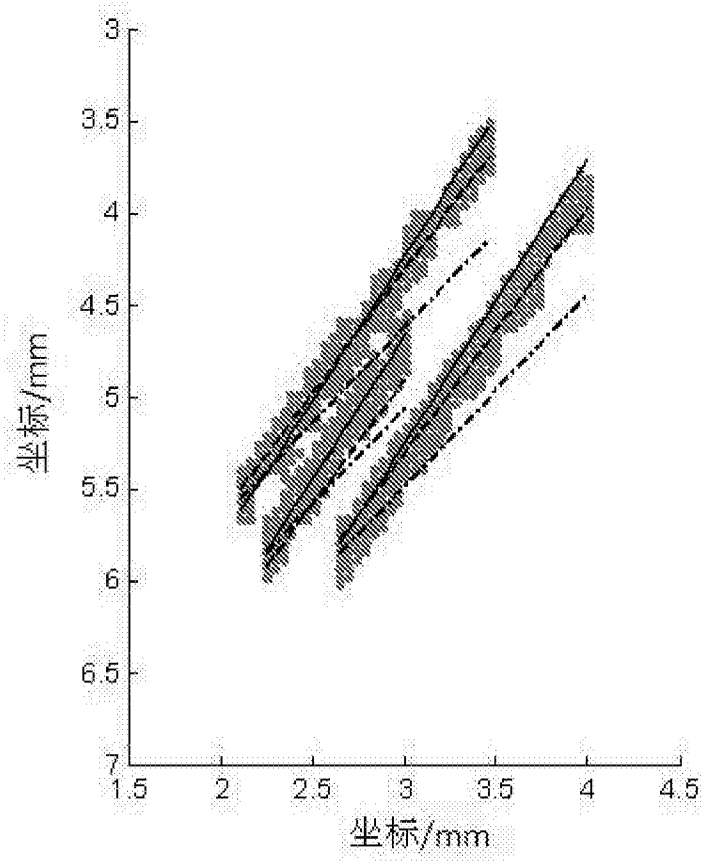


图 8-d

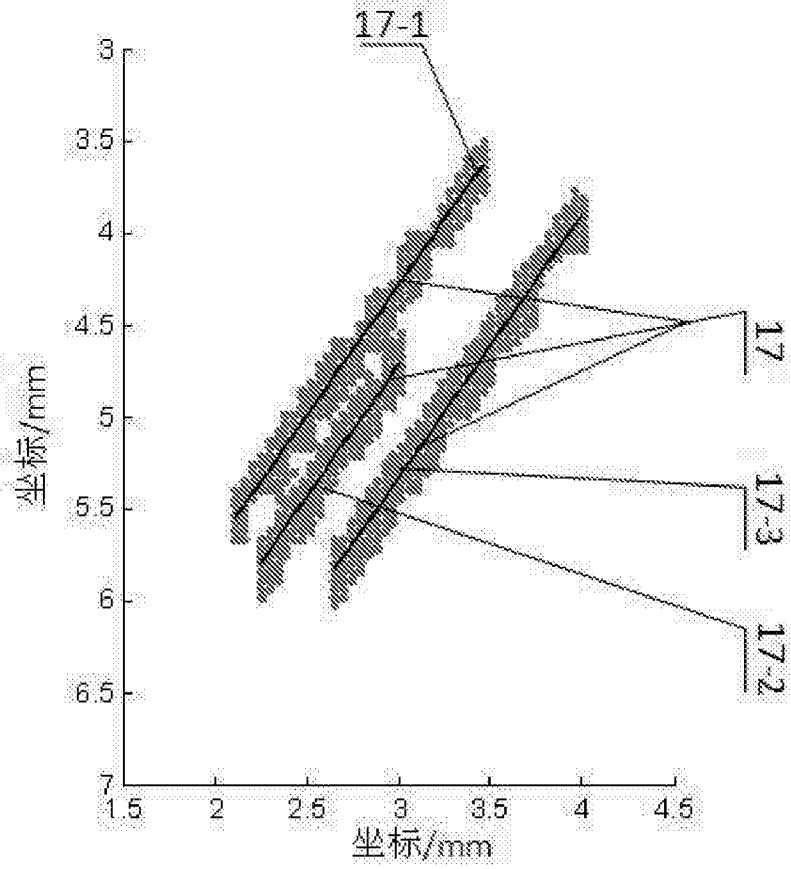


图 9

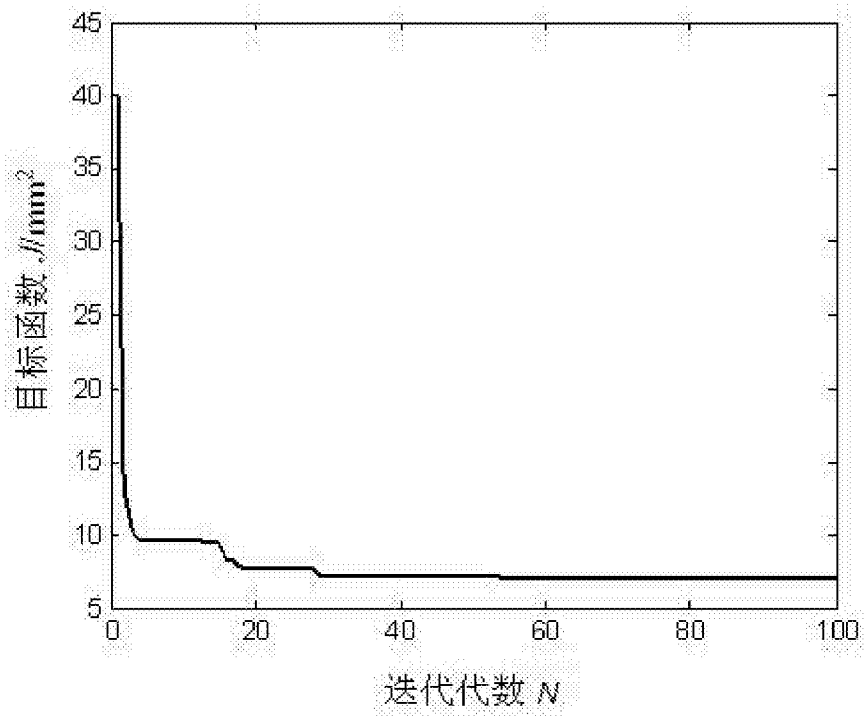


图 10