



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 104330838 B

(45) 授权公告日 2015. 07. 22

(21) 申请号 201410698372. 6

CN 101251605 A, 2008. 08. 27,

(22) 申请日 2014. 11. 26

CN 101581701 A, 2009. 11. 18,

(73) 专利权人 山东大学

CN 102495428 A, 2012. 06. 13,

地址 250061 山东省济南市历城区山大南路  
27 号

CN 103064121 A, 2013. 04. 24,

CN 104035142 A, 2014. 09. 10,

CN 102759751 A, 2012. 10. 31,

(72) 发明人 李术才 刘斌 刘征宇 张庆松  
范克睿 聂利超 张霄 孙怀凤  
刘人太

周宗青等. 岩溶隧道突涌水危险性评价的属性识别模型及其工程应用. 《岩土力学》. 2013, 第 34 卷 (第 3 期), 818-824 页.

(74) 专利代理机构 济南圣达知识产权代理有限公司 37221

审查员 张宇

代理人 赵妍

(51) Int. Cl.

G01V 11/00(2006. 01)

G01N 27/04(2006. 01)

(56) 对比文件

JP 11-133004 A, 1999. 05. 21,

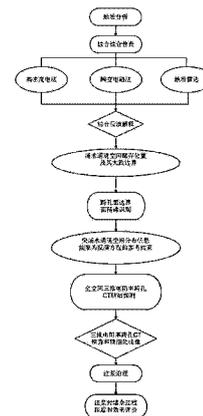
权利要求书4页 说明书9页 附图6页

(54) 发明名称

地下工程突涌水通道精细探查及其注浆封堵效果评价方法

(57) 摘要

本发明公开了一种地下工程突涌水通道精细探查及其注浆封堵效果评价方法,包括:综合物探普查,初步确定突涌水通道的空间赋存范围、规模及其大致边界;实施跨孔地质雷达精细化探测;实施三维电阻率跨孔 CT 精细探测;利用基于时间推移反演的全空间三维电阻率跨孔 CT 方法对注浆封堵的全过程进行跟踪监测评价。本发明有益效果:将综合物探普查和跨孔雷达探测的结果映射到结构化参考模型中,以三维电阻率跨孔 CT 反演为载体,使得对突涌水通道的定位精度和界面分辨效果明显改善;利用基于时间推移反演的全空间三维电阻率跨孔 CT 探测方法对注浆封堵全过程进行监测,为及时发现封堵漏洞、进一步指导补浆作业提供了有益的参考。



CN 104330838 B

1. 一种地下工程突涌水通道精细探查及其注浆封堵效果评价方法,其特征是,包括以下步骤:

(1) 地质分析先行,结合已有地质资料及现场勘察,初步推断突涌水通道可能赋存的大体范围;

(2) 布置测线,对地下洞室周边开展综合物探普查,初步确定突涌水通道的空间赋存范围、规模及其大致边界;

(3) 根据步骤(2)所得的突涌水通道空间分布结果,沿突涌水通道走向在其边界范围外侧打钻孔,实施跨孔地质雷达精细化探测,对整个突涌水通道的边界进一步精确识别和定位;

(4) 在步骤(3)所述的钻孔内布置电极,开展全空间三维电阻率跨孔CT精细探测,构造三维电阻率反演目标函数及反演方程,并对反演方程进行求解,以获得突涌水通道三维精细化反演成像结果;

(5) 根据上述探查结果,对围岩进行注浆加固;

(6) 利用基于时间推移反演的全空间三维电阻率跨孔CT方法对注浆封堵的全过程进行跟踪监测,根据精细化成像结果及时获知各个阶段浆液的运移路径、沉积留核状态、充填封堵质量信息,对注浆封堵的全过程进行跟踪评价。

2. 如权利要求1所述的一种地下工程突涌水通道精细探查及其注浆封堵效果评价方法,其特征是,所述步骤(1)包括以下过程:根据施工地区现有的工程地质和水文地质资料推断洞室围岩中水体可能赋存的大体范围;开展洞内、洞外现场地质勘察并进行地质分析,划分富水地层、突涌水隐患高风险段落并进行重点标注,为开展物探普查提供前期的地质指导。

3. 如权利要求1所述的一种地下工程突涌水通道精细探查及其注浆封堵效果评价方法,其特征是,所述步骤(2)中对地下洞室周边开展综合物探普查包括高密度电法、瞬变电磁法、地质雷达法三种探测方法,将三种物探方法测得的结果进行对比分析,作出综合解释,初步确定突涌水通道的空间赋存位置、规模及其大致边界范围。

4. 如权利要求1所述的一种地下工程突涌水通道精细探查及其注浆封堵效果评价方法,其特征是,所述步骤(3)中沿突涌水通道走向在其边界范围外侧打的钻孔可根据现场实际情况沿任意方向打入围岩,不必严格按照平行方向进行打孔;将雷达发射天线和雷达接收天线分别置于不同钻孔中进行孔间层析透射成像。

5. 如权利要求1所述的一种地下工程突涌水通道精细探查及其注浆封堵效果评价方法,其特征是,所述步骤(4)中开展全空间三维电阻率跨孔CT精细探测,构造三维电阻率反演目标函数及反演方程的方法为:

利用不在同一直线上的三个或三个以上钻孔形成三维立体观测空间,在孔内布置测线形成点源三维电场,对孔间地质结构进行多次覆盖采集和数据分析,将步骤(2)、(3)获得的已知突涌水通道的空间位置和形态抽象为一种先验约束,映射到结构化参考模型中,以三维电阻率跨孔CT反演为载体进行综合解释,构造携带结构化参考模型的三维电阻率反演目标函数及反演方程,并对反演方程进行求解。

6. 如权利要求5所述的一种地下工程突涌水通道精细探查及其注浆封堵效果评价方法,其特征是,假设得到结构化参考模型向量  $m_1$ , 构造携带结构化参考模型的三维电阻率反

演目标函数如下：

$$\Phi = \|\mathbf{d}_{\text{obs}} - \mathbf{d}_m\|_2^2 + \lambda \|\mathbf{C}(\mathbf{m} - \mathbf{m}_r)\|_2^2$$

对应的反演方程为：

$$(\mathbf{A}^T \mathbf{A} + \lambda \mathbf{C}^T \mathbf{C}) \Delta \mathbf{m} = \mathbf{A}^T \Delta \mathbf{d} - \lambda \mathbf{C}^T \mathbf{C}(\mathbf{m} - \mathbf{m}_r)$$

其中， $\mathbf{d}_{\text{obs}}$ 为实际观测数据向量， $\mathbf{d}_m$ 为正演理论观测数据向量， $\Delta \mathbf{d} = \mathbf{d}_{\text{obs}} - \mathbf{d}_m$ 为两者的差向量， $\mathbf{m}$ 为模型参数向量， $\mathbf{A}$ 为偏导数矩阵， $\mathbf{C}$ 为光滑度矩阵， $\lambda$ 为拉格朗日算子，控制光滑约束的权重。

7. 如权利要求 1 所述的一种地下工程突涌水通道精细探查及其注浆封堵效果评价方法，其特征是，所述步骤 (4) 中开展全空间三维电阻率跨孔 CT 精细探测，构造三维电阻率反演目标函数及反演方程的方法还允许为：

利用不在同一直线上的三个或三个以上钻孔形成三维立体观测空间，在孔内布置测线形成点源三维电场，对孔间地质结构进行多次覆盖采集和数据分析，以三维电阻率跨孔 CT 反演为载体进行综合解释，构造携带距离加权函数的三维电阻率反演目标函数及反演方程，并对反演方程进行求解；

所述携带距离加权函数的三维电阻率反演目标函数具体为：

$$\Phi_1 = (\Delta \mathbf{d} - \mathbf{A} \Delta \mathbf{m})^T (\Delta \mathbf{d} - \mathbf{A} \Delta \mathbf{m}) + \eta (\mathbf{W}_1 \mathbf{C} \Delta \mathbf{m})^T (\mathbf{W}_1 \mathbf{C} \Delta \mathbf{m}) ;$$

其中， $\Delta \mathbf{d}$ 表示实测数据与正演理论数据的差向量， $\Delta \mathbf{m}$ 表示模型参数增量向量， $\mathbf{A}$ 表示敏感度矩阵， $\mathbf{C}$ 表示光滑度矩阵； $\eta$ 为拉格朗日常数，用于控制数据方差项和模型方差项之间的权重； $w_1$ 表示网格模型中网格的距离加权因子；

携带距离加权函数的反演方程为：

$$[\mathbf{A}^T \mathbf{A} + \eta (\mathbf{W}_1 \mathbf{C})^T (\mathbf{W}_1 \mathbf{C})] \Delta \mathbf{m} = \mathbf{A}^T \Delta \mathbf{d}$$

其中， $\mathbf{A}$ 为偏导数矩阵， $\Delta \mathbf{m}$ 为模型参数增量向量， $\Delta \mathbf{d}$ 为实测数据与正演理论数据的差向量， $\mathbf{C}$ 表示光滑度矩阵； $\eta$ 为拉格朗日常数， $w_1$ 表示网格模型中网格的距离加权因子。

8. 如权利要求 7 所述的一种地下工程突涌水通道精细探查及其注浆封堵效果评价方法，其特征是，所述模型中网格的距离加权因子  $w_1$  的计算方法为：

建立直角坐标系，假设四个钻孔 P1、P2、P3 和 P4 等间距布置，且距离为  $a$ ，模型中任一网格  $i(x, y, z)$  中心点到各钻孔 P1、P2、P3、P4 的距离  $l_{i1}$ 、 $l_{i2}$ 、 $l_{i3}$ 、 $l_{i4}$  可表示如下：

$$\begin{cases} l_{i1} = \sqrt{x^2 + y^2} \\ l_{i2} = \sqrt{x^2 + (a-y)^2} \\ l_{i3} = \sqrt{(a-x)^2 + (a-y)^2} \\ l_{i4} = \sqrt{(a-x)^2 + y^2} \end{cases} ;$$

则

$$w_{1i}(x, y) = \lg \left[ \beta a \cdot \left( \frac{1}{l_{i1}} + \frac{1}{l_{i2}} + \frac{1}{l_{i3}} + \frac{1}{l_{i4}} \right) \right] ;$$

上式中， $w_{1i}(x, y)$  表示模型中第  $i$  个网格的距离加权因子； $a$  为钻孔间距， $\beta$  为经验估计常数，通过调节  $\beta$  值可以控制距离加权函数的值域在一定范围内变化； $\lg$  表示以 10 为

底的常用对数；

设模型中网格数量为  $M$ ，将距离加权函数写成矩阵形式，即

$$W_i = w_i \cdot I = \begin{bmatrix} w_{i1} & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & w_{i2} & 0 & \cdots & \vdots \\ 0 & 0 & w_{i3} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & 0 & w_{iM} \end{bmatrix}$$

其中， $w_{11}, \dots, w_{iM}$  表示第  $1 \sim M$  个网格的距离加权因子。

9. 如权利要求 1 所述的一种地下工程突涌水通道精细探查及其注浆封堵效果评价方法，其特征是，所述步骤 (6) 中利用基于时间推移反演的全空间三维电阻率跨孔 CT 方法对注浆封堵的全过程进行跟踪监测，其实现过程如下：

1) 对注浆过程中浆脉的运移过程进行全程跟踪监测并将采集到的一系列数据定义为一个集合  $D = (d^1, d^2, d^3, \dots, d^k)^T$ ，其中  $d^i (i = 1, 2, \dots, k)$  表示第  $i$  次采集过程得到的视电阻率数据集，也称作第  $i$  个时间步  $T_i$  得到的视电阻率数据集， $k$  表示采集的次数；

2) 将步骤 (4) 中由精细化成像获得的数据作为背景数据集  $d^{im}$ ；对背景数据集  $d^{im}$  进行归一化处理，得到归一化修正系数  $\alpha_j$ ；对后续时间步所采集到的视电阻率数据集进行同比归一化处理，定义新的归一化数据集  $\sigma D = (d^0, \sigma d^2, \sigma d^3, \dots, \sigma d^k)^T$ ；

3) 分别构造电阻率时间推移反演目标函数和反演方程；

4) 求解反演方程，到各时间步的电阻率反演结果  $R = (m^{ref}, m^{2r}, m^{3r}, \dots, m^{kr})$ ，对反演结果进一步处理，将第  $2 \sim k$  次反演得到的电阻率值分别与初始参考模型比较，以“电导率变化百分比”的形式表示：

$$\delta \sigma^{i-1} = \frac{\sigma^{ir} - \sigma^{ref}}{\sigma^{ref}} = \frac{m^{ref} - m^{ir}}{m^{ir}}, i = 2, 3, \dots, k$$

上式中， $\delta \sigma^{i-1}$  用于定义电导率变化百分比模型， $\sigma$  表示电导率，与电阻率成倒数关系： $\sigma = \frac{1}{m}$ ， $\sigma^{ir}$  表示第  $i$  个时间步  $T_i$  的电导率反演结果， $\sigma^{ref}$  表示初始参考模型的电导率

值， $m^{ir}$  表示反演迭代过程中的第  $i$  个时间步的模型参数， $m^{ref}$  表示初始参考模型；

5) 将得到的  $(k-1)$  个电导率变化百分比模型进行成像处理，获得所监测区域沿时间轴分布的电导率动态变化图像，作为解释和推断注浆过程中浆脉的运移过程以及评价各阶段注浆质量的基础。

10. 如权利要求 9 所述的一种地下工程突涌水通道精细探查及其注浆封堵效果评价方法，其特征是，所述过程 3) 中构造的电阻率时间推移反演目标函数和反演方程分别为：

$$\Phi = (\Delta \sigma d^i - A \Delta m^i)^T (\Delta \sigma d^i - A \Delta m^i) + \zeta (C \Delta m'^i)^T (C \Delta m'^i)$$

$$(A^T A + \zeta C^T C) \Delta m = A^T \Delta \sigma d - \zeta C^T C (m^i - m^{ref})$$

其中， $\Delta \sigma d^i = \sigma d^i - \sigma d_m^i$  表示第  $i$  个时间步归一化后的实际视电阻率向量与理论视电阻率向量的差值， $A$  表示偏导数矩阵， $C$  表示光滑度矩阵， $\Delta m^i$  表示第  $i$  个时间步内的模型参数增量向量， $\Delta m$  表示模型参数增量向量， $\Delta m'^i = m^i - m^{ref}$  表示反演迭代过程中的第  $i$  个时间步的模型参数与初始参考模型间的差异向量， $m^{ref}$  是初始参考模型， $\zeta$  为拉格朗日常数，

---

控制着模型差异向量在目标函数中的权重。

## 地下工程突涌水通道精细探查及其注浆封堵效果评价方法

### 技术领域

[0001] 本发明属于地下工程领域,尤其涉及一种地下工程施工中突涌水通道精细探查及其注浆封堵效果评价方法,

### 背景技术

[0002] 突水涌泥等地质灾害已经成为影响我国交通、水利水电、矿山领域隧道与地下工程建设安全的重大挑战,表现出“高压、大流量、强突发性、强破坏性”等显著特点,突涌水灾害在造成人员伤亡和经济损失方面一直居于各类灾害事故的前列。对于地下工程施工中发生的突涌水灾害,注浆封堵是一种主要的治理手段和方法。在突涌水灾害注浆封堵工作中,突涌水通道的探查是一项先导性工作,可提前探明地下工程突涌水通道的空间位置和赋存形态,为后期的注浆治理提供可靠准确的地质信息。同时,注浆治理效果的评价也是突涌水灾害处置的一项重要工作,可检查浆液的封堵范围、胶结效果和密实程度,从而评价治理效果和质量,为地下工程的长期服役和运营安全奠定基础。然而,由于突水灾害源等致灾构造所赋存的地质环境非常复杂,隐蔽性非常强,突涌水通道的探测及其治理效果的评价工作都十分困难,使得对地下工程突涌水通道的精细探查与有效治理成为一直未能很好解决的难题。

[0003] 具体来说,地下突涌水通道探测及注浆封堵面临以下两个难题:

[0004] 其一,受地下工程施工地质环境复杂、埋深大的制约,地面物探手段难以取得较好的探测效果;单一的洞内物探方法无法融合已知地质信息,反演方程病态程度高、多解性强,在探查中易出现假异常,定位效果差;异常体过于靠近电极容易导致电极附近局部电场发生畸变,使成像结果出现偏差。导致突涌水通道的三维精细探测难题未得到解决。

[0005] 其二,对突涌水通道的注浆封堵过程具有较强的隐蔽性,现有技术如钻孔检测法、数字钻孔摄像、物探法等难以全程跟踪监测注浆过程中浆脉的运移路径、覆盖范围以及沉积留核情况,不能及时发现封堵漏洞,为二次突水事故埋下隐患。

[0006] 综上所述,为克服现有技术的不足,发明了一种地下工程突涌水通道精细探查及其注浆封堵效果评价方法,为突涌水通道的三维空间定位和成像及其注浆封堵全过程跟踪监测评价提供一种可行的方案,以进一步保障地下工程的安全施工。

### 发明内容

[0007] 本发明的目的是为克服上述现有技术的不足,提供一种地下工程突涌水通道精细探查及其注浆封堵效果评价方法。通过精细探测查清地下洞室(隧道)周边及开挖沿线突涌水通道的空间位置和形态并对注浆封堵后的加固效果给出准确、科学的评价,以确保地下工程施工建设安全高效进行。

[0008] 本发明采用的技术方案如下:

[0009] 一种地下工程突涌水通道精细探查及其注浆封堵效果评价方法,包括以下步骤:

[0010] (1) 地质分析先行,结合已有地质资料及现场勘察,初步推断突涌水通道可能赋存

的大体范围；

[0011] (2) 布置测线,对地下洞室周边开展综合物探普查,初步确定突涌水通道的空间赋存范围、规模及其大致边界；

[0012] (3) 根据步骤(2)所得的突涌水通道空间分布结果,沿突涌水通道走向在其边界范围外侧打钻孔,实施跨孔地质雷达精细化探测,对整个突涌水通道的边界进一步精确识别和定位；

[0013] (4) 在步骤(3)所述的钻孔内布置电极,开展全空间三维电阻率跨孔CT精细探测,构造三维电阻率反演目标函数及反演方程,并对反演方程进行求解,以获得突涌水通道三维精细化反演成像结果；

[0014] (5) 根据上述探查结果,对围岩进行注浆加固；

[0015] (6) 利用基于时间推移反演的全空间三维电阻率跨孔CT方法对注浆封堵的全过程进行跟踪监测,根据精细化成像结果及时获知各个阶段浆液的运移路径、沉积留核状态、充填封堵质量信息,对注浆封堵的全过程进行跟踪评价。

[0016] 所述步骤(1)包括以下过程:根据施工地区现有的工程地质和水文地质资料推断洞室围岩中水体可能赋存的大体范围;开展洞内、洞外现场地质勘察并进行地质分析,划分富水地层、突涌水隐患高风险段落并进行重点标注,为开展物探普查提供前期的地质指导。

[0017] 所述步骤(2)中对地下洞室周边开展综合物探普查包括高密度电法、瞬变电磁法、地质雷达法三种探测方法,将三种物探方法测得的结果进行对比分析,作出综合解释,初步确定突涌水通道的空间赋存位置、规模及其大致边界范围。

[0018] 所述步骤(3)中沿突涌水通道走向在其边界范围外侧打的钻孔可根据现场实际情况沿任意方向打入围岩,不必严格按照平行方向进行打孔;将雷达发射天线和雷达接收天线分别置于不同钻孔中进行孔间层析透射成像。

[0019] 所述步骤(4)中开展全空间三维电阻率跨孔CT精细探测,构造三维电阻率反演目标函数及反演方程的方法为:

[0020] 利用不在同一直线上的三个或三个以上钻孔形成三维立体观测空间,在孔内布置测线形成点源三维电场,对孔间地质结构进行多次覆盖采集和数据分析,将步骤(2)、(3)获得的已知突涌水通道的空间位置和形态抽象为一种先验约束,映射到结构化参考模型中,以三维电阻率跨孔CT反演为载体进行综合解释,构造携带结构化参考模型的三维电阻率反演目标函数及反演方程,并对反演方程进行求解。

[0021] 假设得到结构化参考模型向量  $m_r$ , 构造携带结构化参考模型的三维电阻率反演目标函数如下:

$$[0022] \quad \Phi = \|\mathbf{d}_{\text{obs}} - \mathbf{d}_m\|_2^2 + \lambda \|\mathbf{C}(\mathbf{m} - \mathbf{m}_r)\|_2^2 \quad (1)$$

[0023] 对应的反演方程为:

$$[0024] \quad (\mathbf{A}^T \mathbf{A} + \lambda \mathbf{C}^T \mathbf{C}) \Delta \mathbf{m} = \mathbf{A}^T \Delta \mathbf{d} - \lambda \mathbf{C}^T \mathbf{C} (\mathbf{m} - \mathbf{m}_r) \quad (2)$$

[0025] 其中,  $\mathbf{d}_{\text{obs}}$  为实际观测数据向量,  $\mathbf{d}_m$  为正演理论观测数据向量,  $\Delta \mathbf{d} = \mathbf{d}_{\text{obs}} - \mathbf{d}_m$  为两者的差向量,  $\mathbf{m}$  为模型参数向量,  $\mathbf{A}$  为偏导数矩阵,  $\mathbf{C}$  为光滑度矩阵,  $\lambda$  为拉格朗日算子,控制光滑约束的权重。

[0026] 所述步骤(4)中开展全空间三维电阻率跨孔CT精细探测,构造三维电阻率反演目

标函数及反演方程的方法还允许为：

[0027] 利用不在同一直线上的三个或三个以上钻孔形成三维立体观测空间,在孔内布置测线形成点源三维电场,对孔间地质结构进行多次覆盖采集和数据分析,以三维电阻率跨孔 CT 反演为载体进行综合解释,构造携带距离加权函数的三维电阻率反演目标函数及反演方程,并对反演方程进行求解；

[0028] 所述携带距离加权函数的三维电阻率反演目标函数具体为：

$$[0029] \quad \Phi_1 = (\Delta d - A \Delta m)^T (\Delta d - A \Delta m) + \eta (W_1 C \Delta m)^T (W_1 C \Delta m);$$

[0030] 其中,  $\Delta d$  表示实测数据与正演理论数据的差向量,  $\Delta m$  表示模型参数增量向量,  $A$  表示敏感度矩阵,  $C$  表示光滑度矩阵;  $\eta$  为拉格朗日常数,用于控制数据方差项和模型方差项之间的权重;  $w_1$  表示网格模型中网格的距离加权因子；

[0031] 携带距离加权函数的反演方程为：

$$[0032] \quad [A^T A + \eta (W_1 C)^T (W_1 C)] \Delta m = A^T \Delta d$$

[0033] 其中,  $A$  为偏导数矩阵,  $\Delta m$  为模型参数增量向量,  $\Delta d$  为观测数据,  $C$  表示光滑度矩阵;  $\eta$  为拉格朗日常数,  $w_1$  表示网格模型中网格的距离加权因子。

[0034] 所述模型中网格的距离加权因子  $w_1$  的计算方法为：

[0035] 建立直角坐标系,假设四个钻孔 P1、P2、P3 和 P4 等间距布置,且距离为  $a$ ,模型中任一网格  $i(x, y, z)$  中心点到各钻孔 P1、P2、P3、P4 的距离  $l_{i1}$ 、 $l_{i2}$ 、 $l_{i3}$ 、 $l_{i4}$  可表示如下：

$$[0036] \quad \begin{cases} l_{i1} = \sqrt{x^2 + y^2} \\ l_{i2} = \sqrt{x^2 + (a-y)^2} \\ l_{i3} = \sqrt{(a-x)^2 + (a-y)^2} \\ l_{i4} = \sqrt{(a-x)^2 + y^2} \end{cases};$$

[0037] 则

$$[0038] \quad w_{ii}(x, y) = \lg \left[ \beta a \cdot \left( \frac{1}{l_{i1}} + \frac{1}{l_{i2}} + \frac{1}{l_{i3}} + \frac{1}{l_{i4}} \right) \right];$$

[0039] 上式中,  $w_{ii}(x, y)$  表示模型中第  $i$  个网格的距离加权因子;  $a$  为钻孔间距,  $\beta$  为经验估计常数,通过调节  $\beta$  值可以控制距离加权函数的值域在一定范围内变化;  $\lg$  表示以 10 为底的常用对数；

[0040] 设模型中网格数量为  $M$ ,将距离加权函数写成矩阵形式,即

$$[0041] \quad W_I = w_I \cdot I = \begin{bmatrix} w_{11} & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & w_{12} & 0 & \cdots & \vdots \\ 0 & 0 & w_{13} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & 0 & w_{1M} \end{bmatrix}$$

[0042] 其中,  $w_{11}, \dots, w_{1M}$  表示第 1 ~  $M$  个网格的距离加权因子。

[0043] 所述步骤 (6) 中利用基于时间推移反演的全空间三维电阻率跨孔 CT 方法对注浆封堵的全过程进行跟踪监测,其实现过程如下：

[0044] 1) 对注浆过程中浆脉的运移过程进行全程跟踪监测并将采集到的一系列数据定义为一个集合  $D = (d^1, d^2, d^3, \dots, d^k)^T$ , 其中  $d^i (i = 1, 2, \dots, k)$  表示第  $i$  次采集过程得到的视电阻率数据集, 也称作第  $i$  个时间步  $T_i$  得到的视电阻率数据集,  $k$  表示采集的次数;

[0045] 2) 将步骤 (4) 中由精细化成像获得的数据作为背景数据集  $d^{ini}$ ; 对背景数据集  $d^{ini}$  进行归一化处理, 得到归一化修正系数  $\alpha_j$ ; 对后续时间步所采集到的视电阻率数据集进行同比归一化处理, 定义新的归一化数据集  $\sigma D = (d^0, \sigma d^2, \sigma d^3, \dots, \sigma d^k)^T$ ;

[0046] 3) 分别构造电阻率时间推移反演目标函数和反演方程;

[0047] 4) 求解反演方程, 到各时间步的电阻率反演结果  $R = (m^{ref}, m^{2r}, m^{3r}, \dots, m^{kr})$ , 对反演结果进一步处理, 将第 2 ~  $k$  次反演得到的电阻率值分别与初始参考模型比较, 以“电导率变化百分比”的形式表示:

$$[0048] \quad \delta \sigma^{i-1} = \frac{\sigma^{ir} - \sigma^{ref}}{\sigma^{ref}} = \frac{m^{ref} - m^{ir}}{m^{ir}}, i = 2, 3, \dots, k \quad (5)$$

[0049] 上式中,  $\delta \sigma^{i-1}$  用于定义电导率变化百分比模型,  $\sigma$  表示电导率, 与电阻率成倒数

关系:  $\sigma = \frac{1}{m}$ ,  $\sigma^{ir}$  表示第  $i$  个时间步  $T_i$  的电导率反演结果,  $\sigma^{ref}$  表示初始参考模型的电导

率值,  $m^{ir}$  表示反演迭代过程中的第  $i$  个时间步的模型参数,  $m^{ref}$  表示初始参考模型;

[0050] 5) 将得到的  $(k-1)$  个电导率变化百分比模型进行成像处理, 获得所监测区域沿时间轴分布的电导率动态变化图像, 作为解释和推断注浆过程中浆脉的运移过程以及评价各阶段注浆质量的基础。

[0051] 所述过程 4) 中构造的电阻率时间推移反演目标函数和反演方程分别为:

$$[0052] \quad \Phi = (\Delta \sigma d^i - A \Delta m^i)^T (\Delta \sigma d^i - A \Delta m^i) + \zeta (C \Delta m'^i)^T (C \Delta m'^i) \quad (3)$$

$$[0053] \quad (A^T A + \zeta C^T C) \Delta m = A^T \Delta \sigma d - \zeta C^T C (m^i - m^{ref}) \quad (4)$$

[0054] 其中,  $\Delta \sigma d^i = \sigma d^i - \sigma d_m^i$  表示第  $i$  个时间步归一化后的实际视电阻率向量与理论视电阻率向量的差值,  $A$  表示偏导数矩阵,  $C$  表示光滑度矩阵,  $\Delta m^i$  表示第  $i$  个时间步内的模型参数增量向量,  $\Delta m$  表示模型参数增量向量,  $\Delta m'^i = m^i - m^{ref}$  表示反演迭代过程中的第  $i$  个时间步的模型参数与初始参考模型间的差异向量,  $m^{ref}$  是初始参考模型,  $\zeta$  为拉格朗日常数, 控制着模型差异向量在目标函数中的权重。

[0055] 本发明的有益效果如下:

[0056] (1) 本发明提出了一种用于地下工程突涌水通道精细探查方法, 包括地质分析、综合物探普查、跨孔雷达界面精确识别、全空间三维电阻率跨孔 CT 精细探测四个步骤, 为查清地下洞室(隧道)周边及沿线突涌水通道空间位置和形态提供了一套科学有效的探测方法。

[0057] (2) 本发明提出了一种携带结构化参考模型约束的三维电阻率跨孔 CT 精细化反演成像方法, 很好地利用了地质雷达法、跨孔雷达法等对异常体界面识别效果好、定位精度高的优点, 以及高密度电法、瞬变电磁法对水体响应敏感的特点, 使得反演成像结果中对突涌水通道的定位精度显著提高, 对界面的分辨效果明显改善。

[0058] (3) 针对异常体过于靠近电极容易导致电极附近局部电场发生畸变的情况, 本发明还提出了一种三维电阻率 CT “距离加权”反演成像方法, 施加距离加权约束后反演成像

结果中低阻异常的形态与原模型较为吻合,对异常体边界的识别效果明显改善,成像质量较高,距离加权约束对于削弱钻孔附近电场畸变影响、解决反演敏感度较高的问题具有较好的效果。

[0059] (4) 本发明提出了一种可沿任意方向打入围岩的钻孔布置方案,根据综合物探普查的结果设置合理的钻孔孔位,极大地方便了现场施工;同时,本发明提出的三维电阻率跨孔 CT 探测方法利用不在同一直线上的三个或三个以上钻孔形成三维立体观测空间,可根据不同钻孔数目和有效探测区域修正三维有限元模型和观测数据参数,使得三维电阻率跨孔 CT 反演方法具有较强的适应性和灵活性。

[0060] (5) 本发明提出了一种地下工程突涌水通道注浆封堵全过程效果评价方法,利用基于时间推移反演的全空间三维电阻率跨孔 CT 精细化成像方法对注浆封堵全过程进行跟踪监测,根据得到的电导率时间推移图像推断注浆各个阶段浆液的运移路径、沉积留核状态、充填封堵质量等信息,形成注浆封堵效果全过程跟踪评价体系,为及时发现封堵漏洞、进一步指导补浆作业提供了有益的参考。

#### 附图说明:

- [0061] 图 1 为本发明实施流程图;
- [0062] 图 2 为本发明高密度电法测线布置示意图;
- [0063] 图 3 为本发明地质雷达法测线布置示意图;
- [0064] 图 4 为本发明瞬变电磁法测线布置示意图;
- [0065] 图 5 为本发明探测钻孔布置示意图;
- [0066] 图 6 为本发明跨孔雷达工作方式示意图;
- [0067] 图 7(a) - 图 7(c) 为本发明结构化参考模型构建过程示意图;
- [0068] 图 8 为突涌水通道三维电阻率跨孔 CT 精细成像剖切图;
- [0069] 图 9 为本发明模型中任一网格与钻孔距离关系示意图;
- [0070] 图 10(a) - 图 10(c) 为注浆过程三维电阻率跨孔 CT 时间推移反演成像剖切图;
- [0071] 图 11 为注浆完成三维电阻率跨孔 CT 成像剖切图。

#### 具体实施方式:

[0072] 下面通过具体实例和附图对本发明进行进一步的阐述,应该说明的是,下述说明仅是为了解释本发明,并不对其内容进行限定。

[0073] 一种地下工程突涌水通道精细探查及其注浆封堵效果评价方法的实施流程如图 1 所示,具体包括如下步骤:

[0074] A. 地质分析先行,根据施工地区现有的工程地质和水文地质资料推断洞室围岩中水体可能的赋存状态,可能诱发突涌水灾害的含水构造主要有溶洞、暗河、岩溶管道、富水断层等;开展洞内、洞外现场地质勘察并进行地质分析,划分富水地层、突涌水隐患高风险段落并进行重点标注,为开展物探普查提供前期的地质指导。

[0075] B. 在拱顶、边墙和拱底布置测线,利用高密度电法、地质雷达法、瞬变电磁法等对地下洞室开挖沿线及周边开展综合物探普查,初步确定突涌水通道的空间赋存位置、规模及其大致边界范围。

[0076] 高密度电法的测线布置情况如图 2 所示,在边墙、拱顶和拱底进行探测,布置好测点后利用风枪或电锤打孔放入电极,在电极与孔壁间填入浸有电解质溶液的海绵或导电胶以减小接地电阻。高密度电法对水体响应敏感,重点探查洞室周边的隐伏含水构造。

[0077] 地质雷达法测线布置如图 3 所示,沿测线拖动雷达可完成对边墙、拱顶和拱底的探测,地质雷达法对异常体界面识别和定位效果较好,可用以大致确定突涌水通道的边界范围。

[0078] 瞬变电磁法采用中心回线装置或重叠回线装置在边墙进行探测,发射回线与接收回线(探头)的布置如图 4 所示,测点数目可控,根据所需探查精度和范围布置测线并确定测点间距;选好测点后,沿测线拖动发射和接收天线(两天线共圈)线框进行探测,重点探查地下洞室沿线中远距离的水体。

[0079] 利用三种物探方法测得的数据对地下洞室周边突涌水通道进行反演成像处理及综合对比分析,得到如图 7(a) 所示探测成像结果,根据图中显示的低阻区域(电阻率值小于  $200 \Omega \cdot m$ ) 范围初步判断突涌水通道的空间赋存位置、规模及其大致边界。

[0080] C. 根据综合物探普查所得的突涌水通道空间分布结果,设计合理的钻孔布置方案,沿突涌水通道走向在其边界范围外侧打钻孔,钻孔可根据现场施工条件方便沿任意方向打入围岩,不必严格按照平行方向进行打孔,钻孔的布置方案如图 5 所示。

[0081] 利用钻孔实施跨孔雷达精细化探测,跨孔地质雷达探测方法是将雷达发射天线和雷达接收天线分别置于不同钻孔中进行孔间层析透射探测成像的方法,具体探测过程如图 6 所示,首先设定探测步长,固定发射天线,按步长逐次移动接收天线直至完成整个测线的扫描;然后,将发射天线向下移动一个步长,接收天线重复之前操作再次完成整个测线的扫描;依次类推,直至探测完成。孔中探测模式不仅让雷达天线更接近探测目标体,而且避开洞内各种电磁干扰,可获得更精确的探测效果,能够实现对整个突涌水通道边界的进一步精确识别和定位,对突涌水通道边界的探测结果如图 7(b) 所示。

[0082] D. 在钻孔内布置电极,开展全空间三维电阻率跨孔 CT 高分辨率精细探查。值得说明的是,之前所述综合物探普查和跨孔雷达方法均为二维探测方法,难以实现对突涌水通道三维空间展布形态的精确成像。三维电阻率跨孔 CT 探测方法利用不在同一直线上的三个或三个以上钻孔形成三维立体观测空间,在孔内布置测线形成点源三维电场,对孔间地质结构进行多次覆盖采集和数据分析,具有三维反演成像的显著优势。

[0083] 三维电阻率跨孔 CT 探测方法包括两种:

[0084] ①利用不在同一直线上的三个或三个以上钻孔形成三维立体观测空间,在孔内布置测线形成点源三维电场,对孔间地质结构进行多次覆盖采集和数据分析,将获得的已知突涌水通道的空间位置和形态抽象为一种先验约束,映射到结构化参考模型中,以三维电阻率跨孔 CT 反演为载体进行综合解释,构造携带结构化参考模型的三维电阻率反演目标函数及反演方程,并对反演方程进行求解。

[0085] 将综合物探普查和跨孔雷达探测所获得的突涌水通道的位置和形态等空间分布信息,如图 7(a) 和 7(b) 所示,映射到三维电阻率跨孔 CT 反演网格中,构建结构化参考模型,得到如图 7(c) 所示结果,设定结构参考模型中与异常体对应网格的电阻率相等且值为  $\rho_a$ ,除了异常体映射区域之外的背景电阻率取相同值  $\rho_b$ 。据此构造结构参考模型矩阵  $m_r$  并施加到三维电阻率 CT 探测反演目标函数中,构造出携带结构化参考模型约束的反演目

标函数：

$$[0086] \quad \Phi = \|d_{\text{obs}} - d_m\|_2^2 + \lambda \|C(m - m_r)\|_2^2 \quad (1)$$

[0087] 上式中,  $d_{\text{obs}}$  为实际观测数据向量,  $d_m$  为正演理论观测数据向量,  $\Delta d = d_{\text{obs}} - d_m$  为两者的差向量;  $m$  为模型参数向量,  $m_r$  是结构化参考模型向量,  $A$  为偏导数矩阵,  $C$  为光滑度矩阵;  $\lambda$  为拉格朗日算子, 控制光滑约束的权重。对目标函数求偏导可得到携带结构化参考模型约束的反演方程如下：

$$[0088] \quad (A^T A + \lambda C^T C) \Delta m = A^T \Delta d - \lambda C^T C (m - m_r) \quad (2)$$

[0089] 最后, 开展联合反演解释, 形成孔间三维电阻率反演成像结果图, 对钻孔所围成区域内的突涌水通道进行精确的三维空间定位和形态识别。

[0090] 利用携带结构化参考模型约束的三维电阻率跨孔 CT 反演方法进行处理后, 得到如图 8 所示成像结果 (突涌水通道探查的一个剖切面)。从图中可以看出, 突涌水通道的边界识别效果得到显著改善, 其空间位置、形态和规模非常清晰地反映在图像中。

[0091] ②利用不在同一直线上的三个或三个以上钻孔形成三维立体观测空间, 在孔内布置测线形成点源三维电场, 对孔间地质结构进行多次覆盖采集和数据分析, 以三维电阻率跨孔 CT 反演为载体进行综合解释, 构造携带距离加权函数的三维电阻率反演目标函数及反演方程, 并对反演方程进行求解。

[0092] 建立如图 9 所示坐标系, 假设四个钻孔等间距, 距离为  $a$ 。

[0093] 则模型中任一网格  $i(x, y, z)$  中心点到各钻孔 P1、P2、P3、P4 的距离  $l_{i1}$ 、 $l_{i2}$ 、 $l_{i3}$ 、 $l_{i4}$  可表示如下：

$$[0094] \quad \begin{cases} l_{i1} = \sqrt{x^2 + y^2} \\ l_{i2} = \sqrt{x^2 + (a - y)^2} \\ l_{i3} = \sqrt{(a - x)^2 + (a - y)^2} \\ l_{i4} = \sqrt{(a - x)^2 + y^2} \end{cases} \quad (3)$$

[0095] 在式 (3) 的基础上, 提出了如下距离加权函数表达式：

$$[0096] \quad w_{ii}(x, y) = \lg \left[ \beta a \cdot \left( \frac{1}{l_{i1}} + \frac{1}{l_{i2}} + \frac{1}{l_{i3}} + \frac{1}{l_{i4}} \right) \right] \quad (4)$$

[0097] 上式中,  $w_{ii}(x, y)$  表示模型中第  $i$  个网格的距离加权因子;  $a$  为钻孔间距,  $\beta$  为经验估计常数, 通过调节  $\beta$  值可以控制距离加权函数的值域在一定范围内变化;  $\lg$  表示以 10 为底的常用对数。从公式 (4) 可以看出, 距离加权函数仅仅是  $x, y$  的函数, 与深度  $z$  无关。

[0098] 设模型中网格数量为  $M$ , 将距离加权函数写成矩阵形式, 即

[0099]

$$W_j = w_j \cdot I = \begin{bmatrix} w_{j1} & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & w_{j2} & 0 & \cdots & \vdots \\ 0 & 0 & w_{j3} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & 0 & w_{jM} \end{bmatrix} \quad (5)$$

[0100] 携带距离加权函数的三维电阻率反演目标函数可写成如下形式：

$$\Phi_1 = (\Delta d - A \Delta m)^T (\Delta d - A \Delta m) + \eta (W_1 C \Delta m)^T (W_1 C \Delta m) \quad (6)$$

[0102] 对目标函数公式 (6) 求极小值, 可得到对应的反演方程：

$$[A^T A + \eta (W_1 C)^T (W_1 C)] \Delta m = A^T \Delta d \quad (7)$$

[0104] 公式 (7) 即携带“距离加权”约束的三维电阻率 CT 反演方程。从理论上讲, 施加了距离加权约束后, 将有效改善反演方程对孔中电极附近区域敏感度较高而造成的成像不稳定问题, 提高钻孔附近地质异常体的三维定位和识别精度。与此同时, 对于地质异常位于探测范围内其他区域的情况, 距离加权约束基本不会对固有的探测成像效果带来影响。

[0105] E. 根据探查结果提出科学、合理的注浆治理方案, 对围岩进行注浆加固; 注浆治理方法为公知内容, 这里不再赘述。

[0106] F. 在注浆施工过程中对浆脉运移过程进行全程跟踪监测并对注浆后的封堵效果进行评价。开展基于时间推移反演的全空间三维电阻率跨孔 CT 方法对突涌水通道的注浆封堵过程进行精细化成像。

[0107] 首先, 对注浆过程中浆脉的运移过程进行全程跟踪检测并将采集到的一系列数据定义为一个集合  $D = (d^1, d^2, d^3, \dots, d^k)^T$ , 其中  $d^i$  表示第  $i$  次采集过程得到的视电阻率数据集, 也称作第  $i$  个时间步 ( $T_i$ ) 得到的数据集。其次, 将首个时间步采集到的数据集作为背景数据集  $d^{ini} = d^1$ 。选定模型参数标准值  $m_0$ , 设网格电阻率值  $m_l^{ref} = m_0 (l=1, 2, \dots, M)$  为均一初始参考模型, 其中  $M$  表示模型中网格的数量; 对均一模型进行正演求解, 得到正演理论视电阻率数据集  $d_j^0 = m_0 (j=1, 2, \dots, N)$ , 其中  $N$  表示视电阻数据的个数。以  $d^0$  为标准, 对背景数据集进行“归一化”处理, 得到归一化修正系数  $\alpha_j$ :

$$\alpha_j = \frac{d_j^{ini}}{d_j^0}, j=1, 2, \dots, N \quad (8)$$

[0109] 对后续时间步采集到的视电阻率数据集进行同比归一化处理, 得到归一化修正后的视电阻率数据集

$$\sigma d_j^i = \frac{d_j^i}{\alpha_j}, i=2, 3, \dots, k; j=1, 2, \dots, N \quad (9)$$

[0111] 这样就产生了新的归一化数据集合  $\sigma D = (d^0, \sigma d^2, \sigma d^3, \dots, \sigma d^k)^T$ 。再次, 构造电阻率时间推移反演目标函数和反演方程, 其目标函数如为：

$$\Phi = (\Delta \sigma d^i - A \Delta m^i)^T (\Delta \sigma d^i - A \Delta m^i) + \zeta (C \Delta m^i)^T (C \Delta m^i) \quad (10)$$

上式中,  $\Delta \sigma d^i = \sigma d^i - \sigma d_m^i$ , 表示第  $i$  个时间步归一化后的实际视电阻率向量与理论视电阻率向量的差值,  $\sigma d_m^i$  表示理论数据向量,  $A$  表示偏导数矩阵,  $C$  表示光滑度矩阵,  $\Delta m^i$  表示第  $i$  个时

间步内的模型参数增量向量,  $\Delta m^i = m^i - m^{\text{ref}}$  表示反演迭代过程中的第  $i$  个时间步的模型参数与初始参考模型间的差异向量,  $\zeta$  为拉格朗日常数, 控制着模型差异向量在目标函数中的权重。

[0113] 反演方程为:

$$[0114] \quad (A^T A + \zeta C^T C) \Delta m = A^T \Delta \sigma d - \zeta C^T C (m^i - m^{\text{ref}}) \quad (11)$$

[0115] 最后, 求解反演方程, 到各时间步的电阻率反演结果  $R = (m^{\text{ref}}, m^{2r}, m^{3r}, \dots, m^{kr})$ , 对反演结果进一步处理, 将第 2 ~  $k$  次反演得到的电阻率值分别与初始参考模型比较, 以“电导率变化百分比”  $\delta \sigma^{i-1}$  的形式表示:

$$[0116] \quad \delta \sigma^{i-1} = \frac{\sigma^{ir} - \sigma^{\text{ref}}}{\sigma^{\text{ref}}} = \frac{m^{\text{ref}} - m^{ir}}{m^{ir}} \quad (i = 2, 3, \dots, k) \quad (12)$$

[0117] 上式中  $\sigma$  表示电导率, 与电阻率成倒数关系:  $\sigma = \frac{1}{m}$ 。将得到的  $k-1$  个电导率变化

百分比模型用 surfer 绘图软件进行成像处理, 从而获得所监测区域沿时间轴分布的电导率动态变化图像。根据上述反演成像结果, 跟踪评价注浆过程中浆脉的运移过程以及注浆质量, 为解释和推断注浆过程中浆脉的运移过程以及评价各阶段的注浆质量奠定基础。

[0118] 图 10(a)–图 10(c) 所示的三幅图为对突涌水通道进行注浆封堵过程中浆脉运移情况的三维电阻率跨孔 CT 时间推移反演成像结果, 根据成像结果中浆脉与地下水电阻率的差异可以清晰地识别出各阶段浆脉的运移路径和覆盖范围, 即原来的突涌水通道空间 ( $100 \Omega \cdot \text{m}$ ) 逐渐被浆脉 ( $350 \sim 450 \Omega \cdot \text{m}$ ) 所充填。图 11 为注浆充填完成后的三维电阻率跨孔 CT 精细化成像剖切面结果, 可以看到, 原来的突涌水通道空间 ( $100 \Omega \cdot \text{m}$ ) 已全部被浆脉 ( $350 \sim 450 \Omega \cdot \text{m}$ ) 所充填, 表明该处的注浆封堵效果是有安全保障的。根据以上判断标准对地下洞室周边所有隐患区域突涌水通道的注浆封堵效果进行科学严格的评价, 彻底清查地下洞室围岩周边  $30 \sim 50\text{m}$  内存在的富水构造, 及时发现浆液未充填密实的区域并进行补浆, 直至确保整个地下洞室施工能够安全有效的开展。

[0119] 上述虽然结合附图对本发明的具体实施方式进行了描述, 但并非对本发明保护范围的限制, 所属领域技术人员应该明白, 在本发明的技术方案的基础上, 本领域技术人员不需要付出创造性劳动即可做出的各种修改或变形仍在本发明的保护范围以内。

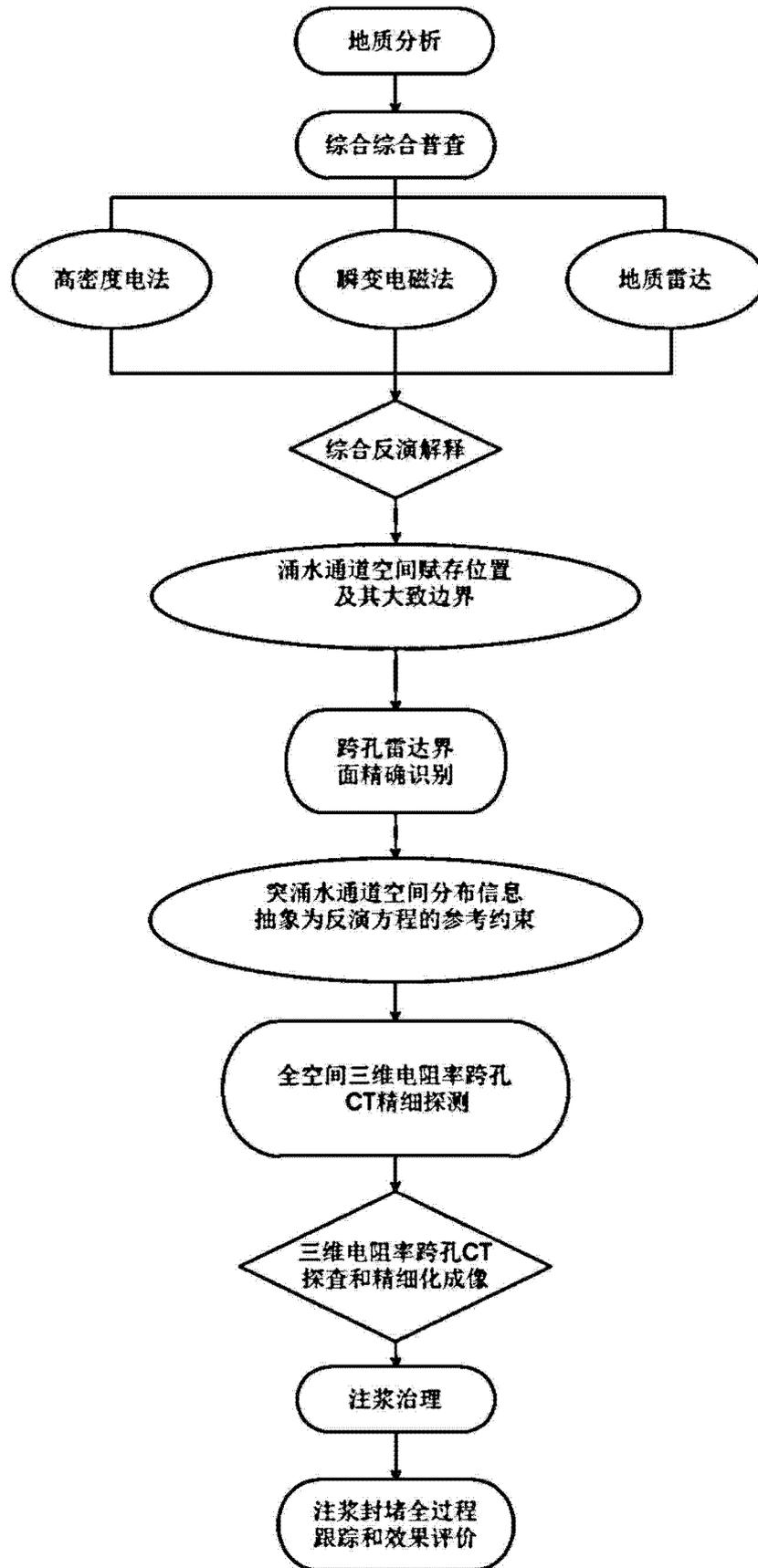


图 1

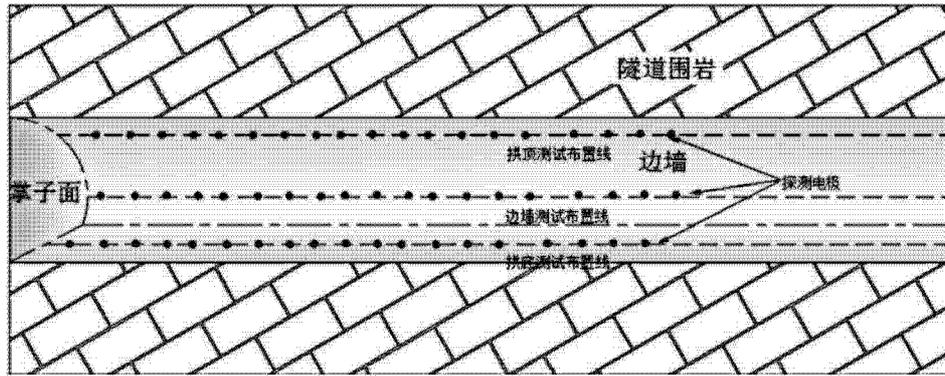


图 2

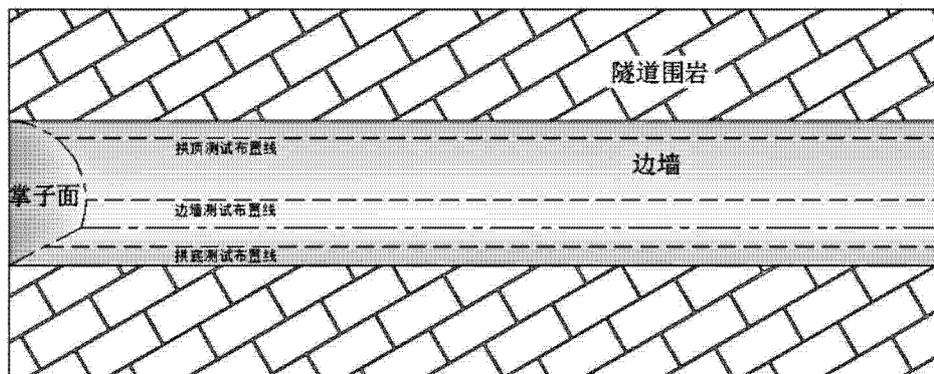


图 3

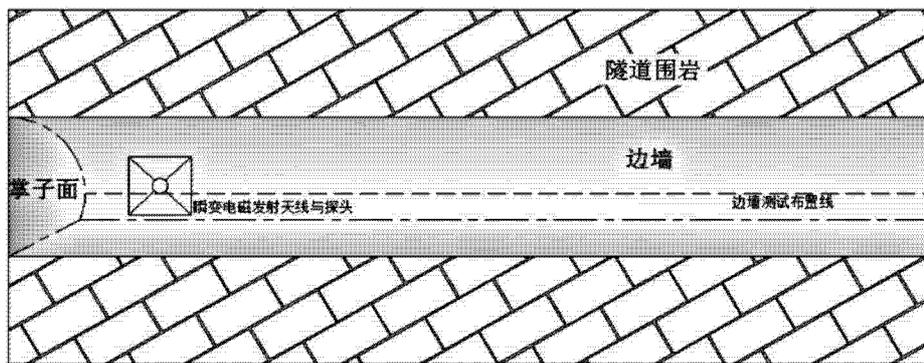


图 4

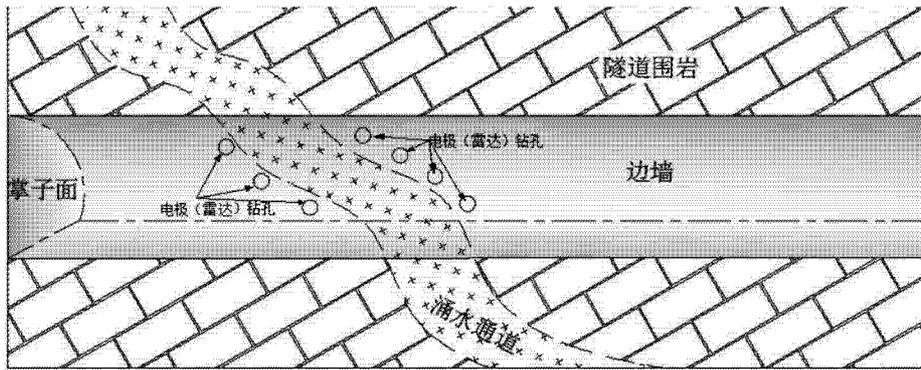


图 5

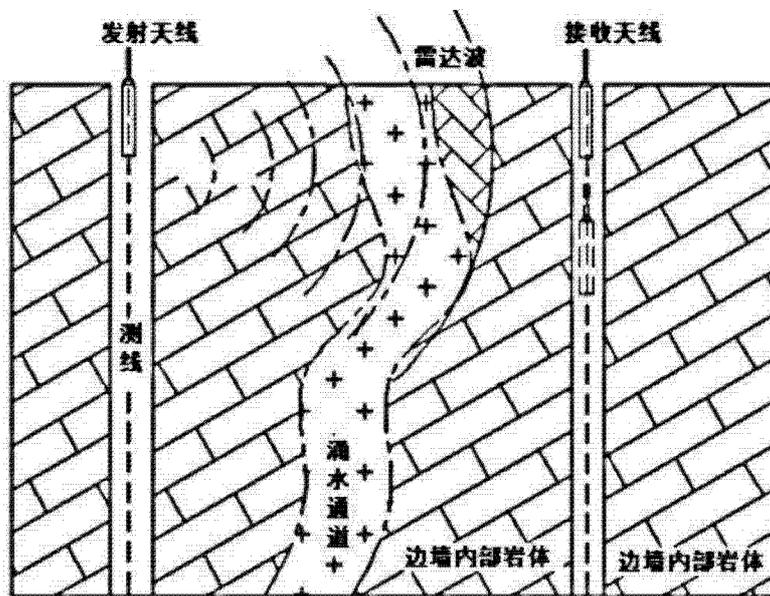


图 6

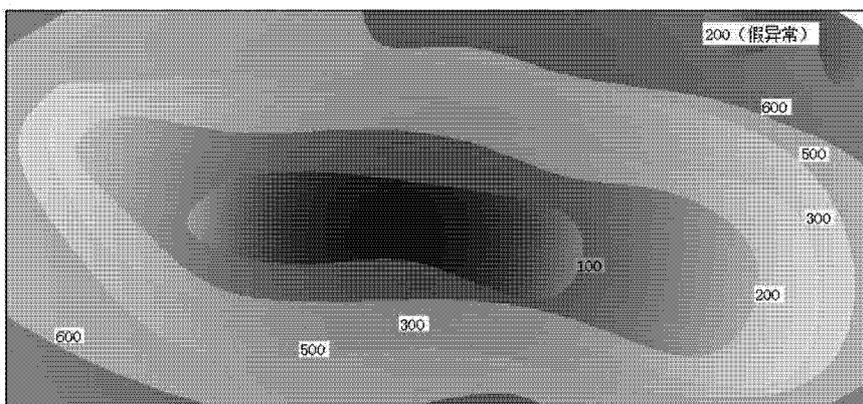


图 7(a)

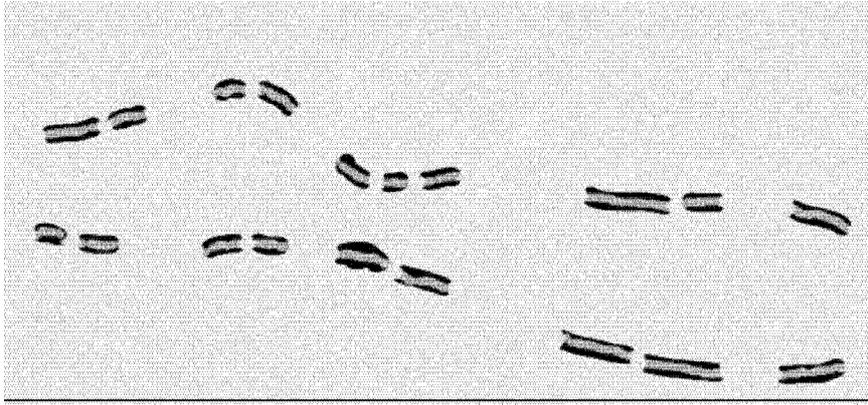


图 7(b)

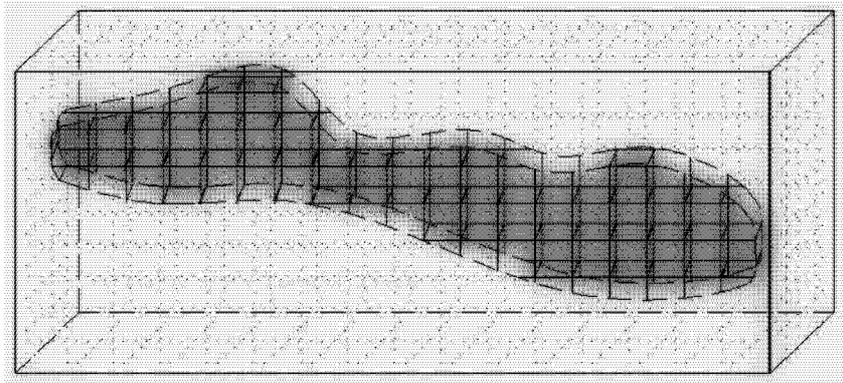


图 7(c)

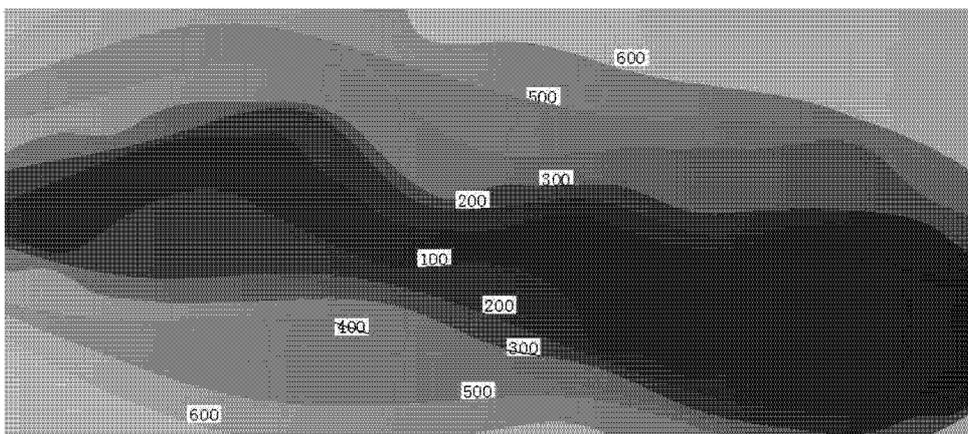


图 8

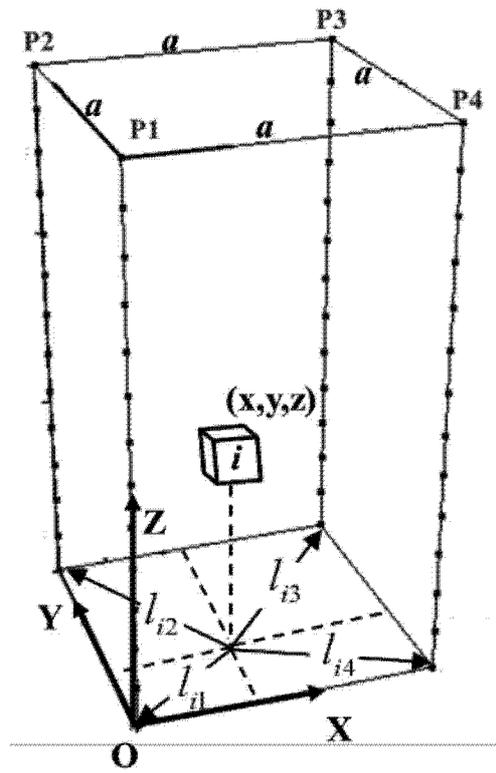


图 9

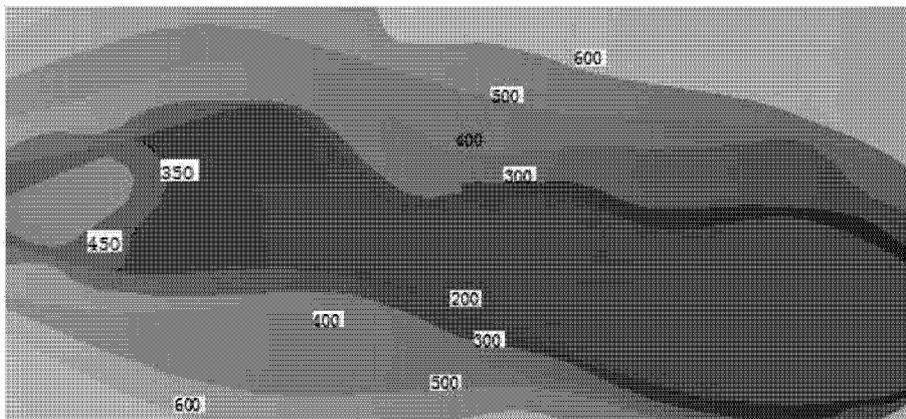


图 10(a)

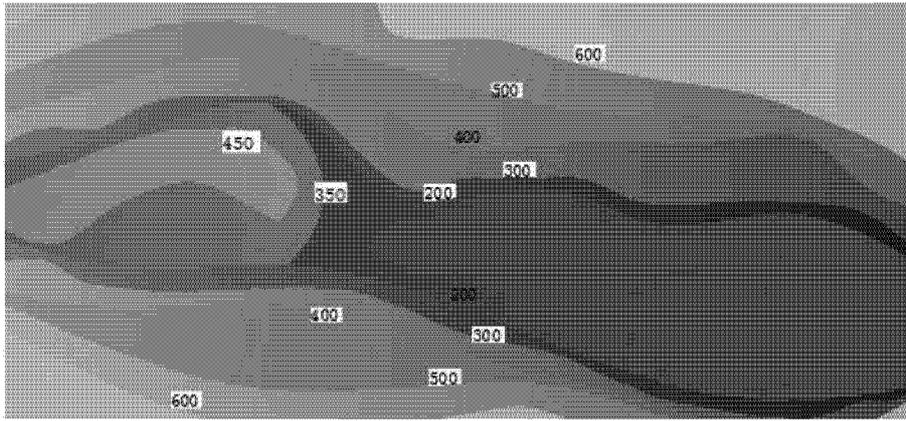


图 10(b)

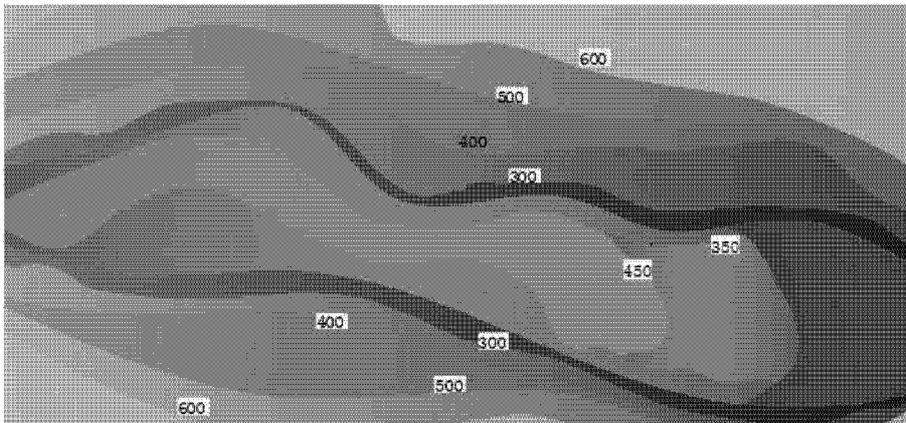


图 10(c)

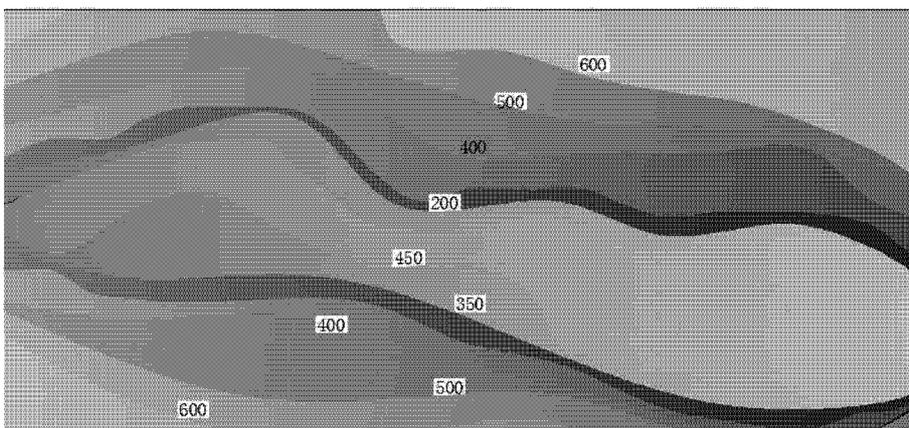


图 11