

说明书

一种高压电脉冲破岩数值模拟方法

技术领域

本申请涉及油气开发技术领域，尤其是涉及一种高压电脉冲破岩数值模拟方法。

背景技术

岩石破碎是岩石工程中必不可少的关键环节，它涉及油气开采、隧道开挖、工程拆除等。目前应用最为广泛的破岩技术为传统式机械破岩，但在面对高温高压深井和超深井钻探时存在效率低、成本高等缺点，因此对于探究高效破岩技术至关重要。目前非机械式岩石破碎方法有很多，这些技术存在一些缺陷，有的受到设备功率的限制，有的目前还处于探索时期。高压电脉冲破岩技术与其它技术相比是一种具有破碎效率高、能量可控、无污染的绿色技术，它被认为是一种具有接近工业化潜力的新型破岩方式，并且高压电脉冲破岩技术已经广泛应用于多种领域当中。然而，尽管电脉冲破岩钻进技术方法可能改善深层和硬岩作业，但多物理场耦合电击穿破岩机理难以解释清楚，这在一定程度上限制了这项技术的工业化应用。

发明内容

本申请的目的在于提供一种高压电脉冲破岩数值模拟方法，填补了现有技术中缺少研究磁场变化对高压电脉冲破岩规律的影响的研究方法的空缺。

本申请提供一种高压电脉冲破岩数值模拟方法，包括：

S1：建立电极钻头几何模型，获取目标待钻井所在地层的岩石的矿物参数，建立非均质岩石有限元模型；所述非均质岩石有限元模型中利用根据 Voronoi 算法生成细化区域；

S2: 建立岩石几何模型，将所述电极钻头几何模型导入所述岩石几何模型，形成基本电脉冲破岩数值模型；其中，所述岩石几何模型与所述非均质岩石有限元模型在外形尺寸、空间坐标、细化区域赋值上一致；

5 S3: 根据电磁场控制方程、击穿场控制方程、电路结构参数控制方程、流固传热控制方程、热力膨胀方程以及带电粒子受力方程建立动态损伤模型；根据所述动态损伤模型和所述基本电脉冲破岩数值模型进行电脉冲破岩的数值模拟，模拟在不同磁场状态下所述岩石的损伤分布情况。

进一步地，在本申请的一些实施例中，电磁场控制方程为：

$$\begin{aligned}\nabla \times \mathbf{D} &= \alpha \\ \nabla \times \mathbf{B} &= 0 \\ \nabla \times \mathbf{E} &= -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \\ \nabla \times \mathbf{H} &= \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}\end{aligned}$$

式中， \mathbf{D} 为电位移矢量； \mathbf{B} 是磁通密度，T； \mathbf{E} 是电场强度，V/m； \mathbf{H} 是磁场强度，A/m； α 是电荷密度，C/m³； t 为时间，s； \mathbf{J} 是电流密度，A/m²。

15 进一步地，在本申请的一些实施例中，击穿场控制方程为：

$$\frac{dD_e}{dt} = \frac{1}{\tau_0} \cdot \frac{|\mathbf{E}|}{|\mathbf{E}_{pc}|} \text{sgn}[F(|\mathbf{E}| - |\mathbf{E}_{pc}|)] \quad (D_e < 1)$$

20 式中， $|\mathbf{E}|$ 为电场强度大小，(V/m)； $|\mathbf{E}_{pc}|$ 为局部电场强度，(V/m)，其是与岩石性质（如内部微观孔隙结构、矿物种类和组分、电学参数等）相关的量，其为与岩石空间分布有关的函数； τ_0 为迟滞时间，(s)； D_e 为表征电击穿过程中岩石状态转变的状态量，介于 0 和 1 之间，其初始量为 0，当 $D_e=0$ ，岩石为规则岩石（电阻）；当 $D_e=1$ ，岩石已经完成了向等离子状态的变形； F 和 sgn 分别为逻辑函数和符号函数；其中，

$$F(a)=\begin{cases} 1, a \geq 0 \\ 0, a < 0 \end{cases}; \quad \text{sgn}(b)=\begin{cases} 1, b \geq 0 \\ 0, b = 0 \\ -1, b < 0 \end{cases}$$

式中， a 和 b 分别为逻辑函数 F 和符号函数 sgn 的自变量。

进一步地，在本申请的一些实施例中，电路结构参数控制方程为：

$$\varphi_{in}(t) = U_R + U_L + U_C + \varphi_d$$

- 5 式中， $\varphi_{in}(t)$ 为原始输出电压，V； U_R 为回路等效电阻两端电压，V； U_L 为回路电感两端的电压，V； U_C 为电容两端的电压，V； φ_d 为加载在高压电极两端的电压，V。

进一步地，在本申请的一些实施例中，流固传热控制方程为：

$$c_p \rho \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + q_t$$

- 10 式中， T 为温度，K； ρ 为密度， kg/m^3 ； c_p 为恒压热容， $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ； k 为导热系数， $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ； q_t 为热源， W/m^3 ，其为焦耳热源。

进一步地，在本申请的一些实施例中，热力膨胀方程为：

$$\sigma_{th} = \mathbf{C} : \varepsilon_{th}$$

- 15 式中， σ_{th} 为热应力，Pa； \mathbf{C} 为各向同性弹性矩阵，其为材料弹性模量 E_t (Pa) 和泊松比 μ 的函数。

进一步地，在本申请的一些实施例中，带电粒子受力方程为：

$$\mathbf{F} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B})$$

$$\frac{d\mathbf{v}}{dt} = \frac{q}{m} (\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B})$$

- 20 式中 m 和 q 分别表示带电粒子的质量和电荷； \mathbf{E} 是电场强度，V/m； \mathbf{B} 是磁通密度，T； \mathbf{v} 是离子速度，m/s。

进一步地，在本申请的一些实施例中，所述电脉冲破岩的数值模拟包括自激磁场电脉冲破岩模拟、外磁场电脉冲破岩模拟，得到岩石的损伤分

布。

进一步地，在本申请的一些实施例中，所述自激磁场电脉冲破岩模拟包括在有自激磁场的环境中进行电脉冲破岩模拟、在无自激磁场的环境中进行电脉冲破岩模拟、在不同电压下产生的自激磁场的环境中进行电脉冲破岩模拟，得到岩石的损伤分布；

所述外磁场电脉冲破岩模拟包括在有外加磁场的环境中进行电脉冲破岩模拟、在无外加磁场的环境中进行电脉冲破岩模拟、在不同磁感应强度的下的外加磁场的环境中进行电脉冲破岩模拟，得到岩石的损伤分布。

进一步地，在本申请的一些实施例中，非均质岩石有限元模型的建立包括：

建立电极钻头几何模型和目标待钻井所在地层的岩石的岩石有限元模型，并对所述岩石有限元模型中与所述电极钻头几何模型直接接触的区域进行细分，并基于 Voronoi 算法建立细分区域；

获取所述细分区域的材料属性包括分组信息、材料参数和力学参数；
对所述细分区域进行材料属性赋值，建立非均质岩石有限元模型；

所述材料属性的获取包括：

根据所述矿物参数，采用 PFC2D 软件生成二维 Voronoi 的中心点坐标，然后在 Abaqus/Explicit 软件中根据所述中心点坐标生成晶粒形状为二维 Voronoi 的几何模型；

在 Abaqus/Explicit 软件中根据所述二维 Voronoi 的几何模型建立相应尺寸的岩石模型并划分网格单元，再根据岩石有限元模型的网格划分结果，赋予每个单元相应的矿物参数；

其中，所述矿物参数包括岩石的矿物成分、矿物的体积分数、矿物材料种类、不同矿物的密度以及矿物颗粒的粒径大小；所述矿物参数为含有坐标的矿物参数。

本申请提供一种高压电脉冲破岩数值模拟方法，该模拟方法是以磁场

变化情况为主进行耦合分析的数值模拟方法，从电路场、电流场、击穿场、传热场、固体力学场和磁场六场耦合实现了高压电脉冲破岩和等离子通道生成全过程，综合考虑了磁场的变化情况（无磁场、自磁场和外部磁场）对岩石内部等离子通道形成的影响，同时探究了带电粒子在击穿通道中的运动情况，可为电脉冲破岩技术的发展提供一定的理论指导和技术指导，为电脉冲破岩工具的研制和参数优化提供了参考；

此外，本申请基于真实岩样的室内扫描实验及衍射实验获得矿物参数，较准确的表现了岩石的非均质性，根据 XRD 衍射实验和 CT 扫描实验确定的钻进地层中岩石的矿物成分、矿物的质量分数、不同矿物的密度以及矿物颗粒的粒径范围来建立基于 Voronoi 细分的岩石有限元模型，能够较好的贴合岩石的实际情况。

附图说明

图 1 为本申请实施例中所用的电脉冲破岩二维击穿模型；

图 2 为本申请实施例中的基于 Voronoi 算法的非均质岩石有限元模型建立过程；

图 3（a）~3（h）为本申请实施例中的非均质岩石有限元模型的细分区域的力学参数标定结果；其中 3（a）为泊松比的标定结果，图 3（b）为弹性模量的标定结果，3（c）为孔隙率的标定结果，3（d）为密度的标定结果，3（e）为比热容的标定结果，3（f）为相对介电常数的标定结果，3（g）为热胀系数的标定结果，3（h）为空间体积密度阈值的标定结果；

图 4 为本申请实施例中的 55kv 下无磁场和自磁场的电脉冲破岩效果对比图；

图 5 为本申请实施例中的在外磁场作用下的电脉冲破岩效果对比图；

图 6 为本申请实施例中的在无磁场和自磁场作用下的带电粒子的分布情况；

图 7 为本申请实施例中的在无磁场和自磁场作用下的带电粒子的速度分布情况图；

图 8 为本申请实施例中的不同电压下的无磁场和自磁场的电脉冲破岩效果对比分析图；

5 图 9 为本申请提供的在外磁场作用下的带电粒子的分布情况和速度分布情况图。

图 10 为本申请提供的方法的流程示意图。

具体实施方式

下面将结合实施例对本申请方案进行清楚、完整地描述，显然，所描述的实施
10 述的实施例是本申请一部分实施例，而不是全部的实施例。基于本申请中的实施例，本领域普通技术人员在没有做出创造性劳动前提下所获得的所有其他实施例，都属于本申请保护的范围。

本申请提供一种高压电脉冲破岩数值模拟方法，如图 10 所示，包括：

S1：建立电极钻头几何模型，获取目标待钻井所在地层的岩石的矿物
15 参数，建立非均质岩石有限元模型；所述非均质岩石有限元模型中利用根据 Voronoi 算法生成细化区域；

S2：建立岩石几何模型，将所述电极钻头几何模型导入所述岩石几何模型，形成基本电脉冲破岩数值模型；其中，所述岩石几何模型与所述非均质岩石有限元模型在外形尺寸、空间坐标、细化区域赋值上一致；

20 S3：根据电磁场控制方程、击穿场控制方程、电路结构参数控制方程、流固传热控制方程、热力膨胀方程以及带电粒子受力方程建立动态损伤模型；根据所述动态损伤模型和所述基本电脉冲破岩数值模型进行电脉冲破岩的数值模拟，模拟在不同磁场状态下所述岩石的损伤分布情况。

在步骤 S1 中，岩石的矿物参数根据岩层获取的岩样利用 XRD 衍射实验、CT 扫描实验等获得矿物参数的常规手段得到，其矿物参数包括岩石的
25

矿物成分、矿物的体积分数、矿物材料种类、不同矿物的密度以及矿物颗粒的粒径大小。利用该方法获得的矿物参数进行赋值，有利于使模拟得到的破岩效率与实际的破岩效率更为接近，模型模拟结果的有效性更优。

其中本申请中的矿物参数为含有坐标的矿物参数，其矿物颗粒通过
5 PFC2D 软件（美国 ITASCA 咨询集团公司）生成，其矿物颗粒的坐标也通过 PFC2D 软件得到。

根据钻井所用的电极钻头，建立电极钻头几何模型和目标待钻井所在
地层的岩石的岩石有限元模型，并对所述岩石有限元模型中与所述电极钻
头几何模型直接接触的区域进行细分，并基于 Voronoi 算法建立细分区域；
10 获取所述细分区域的材料属性，包括材料参数和力学参数；对所述细
分区域进行材料属性赋值，建立非均质岩石有限元模型；

所述材料属性的获取包括：

根据所述矿物参数，采用 PFC2D 软件生成二维 Voronoi 的中心点坐标，
然后在 Abaqus/Explicit 软件中根据所述中心点坐标生成晶粒形状为二维
15 Voronoi 的几何模型；

在 Abaqus/Explicit 软件中根据所述二维 Voronoi 的几何模型建立相应尺
寸的岩石模型并划分网格单元，再根据岩石有限元模型的网格划分结果，
赋予每个单元相应的材料参数；

每个单元被赋值的材料参数和力学参数包括但不限于相对介电常数、
20 电导率、空间体积能量密度、密度、泊松比、弹性模量、孔隙率等，以保
证岩石的非均质性，使数值仿真模型与实际岩石更为贴近。

在步骤 S1 中，电极钻头几何模型为根据所采用的电极钻头的类型、尺
寸等参数而建立的与实际相符的电极钻头几何模型，如电脉冲钻头有限元
模型。在步骤 S2 中，岩石几何模型为根据所对应的岩石地层的情况而建立
25 的与实际尽可能相符的岩石几何模型，如花岗岩几何模型。

由于本申请所针对的是钻井过程中电极钻头在不同磁场下情况破岩的

模拟，因此岩石有限元模型建立之后，对岩石有限元模型进行网格划分，并还需要对电极钻头与岩石在钻井过程中需要接触的部分的网格进一步细分，以便于提高精度，此处电极钻头与岩石在钻井过程中接触的部分以下简称为“细分区域”，该细分区域的网格划分相较于其他区域更为细小，
5 如在细分区域其网格大小为 0.2mm、其他区域的网格大小为 2.0mm。

在步骤 S3 中，细分区域的力学参数包括单轴压缩强度、抗拉强度和杨氏模量。该力学参数也是含有坐标的力学参数。因此根据坐标可以将该力学参数和上述的矿物参数赋值在细分区域和其他区域，并对细分区域的矿物进行赋值，得到材料和力学参数赋值的细分区域，进而建立非均质岩石
10 有限元模型。

在步骤 S2 中，岩石几何模型的建立可以根据 COMSOL Multiphysics(瑞典 COMSOL 公司)建立，即在 COMSOL Multiphysics 软件中建立与非均质岩石有限元模型在外形尺寸、空间坐标上完全一致的岩石几何模型，便于非均质岩石有限元模型的数据可以直接与岩石几何模型通用。

15 将电极钻头几何模型也导入岩石几何模型，然后仅需要将非均质岩石有限元模型中的数据输出为适用于 COMSOL Multiphysics 软件的函数，即可直接导入 COMSOL Multiphysics 软件中，赋值在岩石几何模型上，即可形成基本电脉冲破岩数值模型，不影响数据的精度和有效性，减少误差和计算量。同时，此处非均质岩石有限元模型中的数据输出的函数为插值函数，
20 有利于进一步提高数据的完整性。

在本申请中，电击穿数值模型主要通过电流场、电路场、磁场、击穿场、传热场和固体力学场六场相互耦合实现破岩全过程。因此电脉冲的基本理论的确定主要围绕这六场实验相关控制方程，以建立动态损伤模型。因此本申请提供的动态损伤模型是基于电磁场控制方程（Maxwell 微分方程）、
25 击穿场控制方程（损伤表达方程）、电路结构参数控制方程（基尔霍夫方程）、流固传热控制方程、热力膨胀方程以及带电粒子受力方程来

建立，其具体建立过程包括以下步骤：

(1) 电流和磁场控制方程

对于一般的时变的电磁场，Maxwell 的微分方程可以描述为：

$$\nabla \times \mathbf{D} = \alpha \quad (1)$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = 0 \quad (2)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (3)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (4)$$

式中， \mathbf{D} 为电位移矢量； \mathbf{B} 是磁通密度，T； \mathbf{E} 是电场强度，V/m； \mathbf{H} 是
磁场强度，A/m； α 是电荷密度，C/m³； t 为时间，s； \mathbf{J} 是电流密度，A/m²；

10 ∇ 为梯度的数学符号。此外，辅助方程如下：

$$\mathbf{J} = -\sigma \left(\nabla \varphi + \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \right) \quad (5)$$

$$\mathbf{D} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \mathbf{E} \quad (6)$$

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mu_r \mathbf{H} \quad (7)$$

式中， \mathbf{A} 为磁矢势，Wb/m； σ 为电导率，S/m； t 为时间，s； φ 为电势，

15 V； ε_0 为真空介电常数，其值为 8.854×10^{-12} F/m， ε_r 为介质（岩石、电极和

绝缘液体）的相对介电常数； μ_0 为真空磁导率，其值为 1.26×10^{-6} H/m， μ_r
为（岩石、电极和绝缘液体）的相对磁导率。

(2) 击穿场控制方程

在电击穿过程中，岩石的电学性质介于电阻和理想导体之间。当岩石

20 内部的电场强度小于其内部击穿强度时，本文将其表征为电阻；当等离子

体通道在岩石中形成时，它就是导体。在这种情况下，岩石状态转变由状态量 D_e 表示，介于 0 和 1 之间。当 $D_e=0$ ，岩石为规则岩石（电阻）。当 $D_e=1$ ，岩石已经完成了向等离子状态的变形。本研究中的击穿场控制方程为：

$$\frac{dD_e}{dt} = \frac{1}{\tau_0} \cdot \frac{|\mathbf{E}|}{|\mathbf{E}_{pc}|} \text{sgn}[F(|\mathbf{E}| - |\mathbf{E}_{pc}|)] \quad (D_e < 1) \quad (8)$$

式中， $|\mathbf{E}|$ 为电场强度大小，（V/m）； $|\mathbf{E}_{pc}|$ 为局部电场强度，（V/m），其是与岩石性质（如内部微观孔隙结构、矿物种类和组分、电学参数等）相关的量，其为与岩石空间分布有关的函数； τ_0 为迟滞时间，（s）； D_e 为表征电击穿过程中岩石状态转变的状态量，其初始量为 0； F 和 sgn 分别为逻辑函数和符号函数：

$$F(a) = \begin{cases} 1, & a \geq 0 \\ 0, & a < 0 \end{cases} \quad (9)$$

$$\text{sgn}(b) = \begin{cases} 1, & b \geq 0 \\ 0, & b = 0 \\ -1, & b < 0 \end{cases} \quad (10)$$

式中， a 和 b 分别为逻辑函数 F 和符号函数 sgn 的自变量（输入参数）。

对于一个电势或电场强度分布确定的电场，欲使电击穿得到萌生，公式（8）中需要确定的物理量有局部电场强度 $|\mathbf{E}_{pc}|$ 和迟滞时间 τ_0 。局部电场强度 $|\mathbf{E}_{pc}|$ 计算公式为：

$$|\mathbf{E}_{pc}| = \left[\frac{2}{\epsilon_r \epsilon_0} \left(\sqrt{E_t^2 + 2E_t w_f} - E_t \right) \right]^{1/2} \quad (11)$$

式中， E_t 为岩石的弹性模量，（Pa）； w_f 为空间体积能密度阈值，（J/m³）。

对于迟滞时间 τ_0 ，

$$\tau_0 = A + B_1 e^{-E_m/C_1} + B_2 e^{-E_m/C_2} \quad (12)$$

式中， E_m 为名义强度，（V/m）； A 、 B_1 、 B_2 、 C_1 和 C_2 为根据实验数据拟合而来的常数。名义击穿强度 E_m 是一个名义的、且宏观可以测量的量，其大致为高压电极和接地电极之间的电势差 $\Delta\varphi$ 和电极间距 L_s 比值，即，

$$E_m = \frac{\Delta\varphi}{L_s} = \frac{\varphi_d}{L_s} \quad (13)$$

式中， $\Delta\varphi$ 为高压电极和接地电极之间的电势差，（V）； φ_d 为高压电极的电势，（V）； L_s 为电极间距，（m）。

在电击穿模型中其它参数的取值为 $\sigma_{\max} = 4 \times 10^7 \text{ S/m}$ ， $\varepsilon_{\max} = 206$ 。

在击穿过程中岩石的性质会发生变化。其中岩石的电导率和相对介电常数会增大；相反，其力学性质和电场强度性质会弱化。电击穿过程中岩石的性质介于电阻和等离子体之间，利用含孔隙岩石的电导率的描述方法（阿奇尔定律），将击穿过程中的岩石看成是以常态岩石（未被击穿）和击穿后的等离子体态组成的二元组分混合物，其物理性质的描述方法为，

$$M = (1 - D_e)M_0 + D_e M_e \quad (14)$$

式中， M 为击穿过程中岩石的材料属性，可为相对介电常数 ε_r 、 $|E_{pc}|$ 为击穿过程中岩石的电击穿强度 $|E_{pc}|$ 、弹性模量 E_t 和迟滞时间 τ_0 ； M_0 为初始状态时岩石的材料属性； M_e 为击穿结束后岩石（等离子体）的材料属性。

对于电导率利用阿伦尼乌斯方程将其转化为对数形式，即得到岩石电导率的演化方程为

$$\log \sigma = (1 - D_e) \log(\sigma_{\min}) + D_e \log(\sigma_{\max}) \quad (15)$$

式中， σ 为击穿过程中岩石的电导率，（S/m）； σ_{\min} 为初始状态时岩石

的电导率，(S/m)； σ_{\max} 为击穿结束后岩石（等离子体）的电导率，(S/m)。

(3) 电路结构参数的耦合

对于电路结构参数，将除了岩石之外的其他电路结构参数等效为三个基本的电路结构单元——电容、电感和电阻，利用基尔霍夫方程求得电路
5 场的控制方程为，

电脉冲发生装置的基本组成分别为回路电容 C 、电阻 R 和电感 L 。 $\varphi_m(t)$ 为高压电脉冲发生装置的额定输出波形。则根据回路的基尔霍夫定律有

$$\varphi_{in}(t) = U_R + U_L + U_C + \varphi_d \quad (1)$$

式中， $\varphi_m(t)$ 为原始输出电压，V； U_R 为回路等效电阻两端电压，V； U_L
10 为回路电感两端的电压，V； U_C 为电容两端的电压，V； φ_d 为加载在高压电极两端的电压，V。

在电击穿前，岩石的电阻极，回路中的电流接近 0，则此时加载在高压电极两端的电压 φ_d 为：

$$\varphi_d \approx \varphi_{in}(t) \quad (2)$$

15 进一步地，在电击穿萌生时，由于岩石的电导率逐渐增大（即电阻逐渐减小），回路中的电流也逐渐增大，此时加载在高压电极两端的电压 φ_d 为：

$$\varphi_d = \varphi_{in}(t) - i(t)R - L \frac{di(t)}{dt} - \frac{1}{C} \int_0^t i(t) dt \quad (16)$$

20 式中 φ_d 为加载在高压电极两端的电压，V； R 等效电阻， Ω ； L 回路电感，H； $i(t)$ 为回路电流，A； C 为回路电容，F。

(4) 流固传热控制方程

传热过程中的控制方程为有源的传热方程（时间极短，可以忽略对流项），即，

$$c_p \rho \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + q_t \quad (17)$$

式中， T 为温度，K； ρ 为密度， kg/m^3 ； c_p 为恒压热容， $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ； k 为导热系数， $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ； q_t 为热源， W/m^3 ，其为焦耳热源，其计算式为，

$$q_t = |\mathbf{J}| \cdot |\mathbf{E}| \quad (18)$$

5 式中， $|\mathbf{E}|$ 为电场强度矢量大小， V/m ； $|\mathbf{J}|$ 为电流密度矢量大小， A/m^2 。

(5) 热力膨胀过程

在“传热效应”产生的同时，等离子体通道受热膨胀，产生冲击应力，这些应力的幅值可达 10^9 - 10^{10}Pa 。在讨论电脉冲破岩过程中的热力膨胀过程时，为了简化计算，只对岩石进行分析。热力膨胀过程的控制方程为弹性
10 方程（胡克定律），即，

$$\sigma_{\text{th}} = \mathbf{C} : \varepsilon_{\text{th}} \quad (19)$$

式中， σ_{th} 为热应力， Pa ； \mathbf{C} 为各向同性弹性矩阵，其为材料弹性模量 E_t (Pa) 和泊松比 μ 的函数。即，

$$\mathbf{C} : = \mathbf{C}(E_t, \mu) \quad (20)$$

15 方程（19）中的热应变通过流固传热过程中的温度变化计算，即，

$$\varepsilon_{\text{th}} = \alpha(T) (T(t) - T_0) \quad (21)$$

式中， ε_{th} 为热应变； $\alpha(T)$ 为热胀系数， (K^{-1}) ； T_0 为初始温度； K ； $T(t)$ 为温度， K 。

(6) 带电粒子受力方程的建立

20 根据岩石的力学平衡方程：

$$\nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} + \mathbf{F}_v = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial^2 t} \quad (22)$$

其中 σ 是应力， \mathbf{F}_v 是主体力。岩石的力学行为本质上是强度的退化和承载力的降低。

当在时变电磁场中，等离子通道中的带电粒子的受力情况和运动方程：

$$\mathbf{F} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad (22)$$

$$\frac{d\mathbf{v}}{dt} = \frac{q}{m} (\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad (23)$$

式中 m 和 q 分别表示带电粒子的质量和电荷。 \mathbf{E} 是电场强度，V/m； \mathbf{B} 是磁通密度，T； \mathbf{v} 是离子速度，m/s。垂直于电场的磁场由于洛伦兹力而改变了离子运动到摆线的路径。

根据方程，假设高压电极与接地电极之间为匀强电场，其中 X-Y 为坐标，即可得到带电粒子速度方程如下，

$$\mathbf{v}_x = \frac{\varphi}{|\mathbf{B}|l} \sin\left(\frac{q|\mathbf{B}|}{m}t\right) + \mathbf{v}_x(0) \cos\left(\frac{q|\mathbf{B}|}{m}t\right) \quad (24)$$

$$\mathbf{v}_y = \frac{\varphi}{|\mathbf{B}|l} \left(1 - \cos\left(\frac{q|\mathbf{B}|}{m}t\right)\right) + \mathbf{v}_x(0) \sin\left(\frac{q|\mathbf{B}|}{m}t\right) + \mathbf{v}_y(0) \quad (25)$$

式中 \mathbf{v}_x 和 \mathbf{v}_y 是离子在 X 和 Y 方向上的速度。 $\mathbf{v}_x(0)$ 和 $\mathbf{v}_y(0)$ 表示带电粒子在 X 和 Y 方向上的初始速度，m/s； φ 是电势，V； l 是电极之间的距离，m。因此，带电粒子的路径方程为，

$$X = \frac{m\varphi}{q|\mathbf{B}|^2l} \left(1 - \cos\left(\frac{q|\mathbf{B}|}{m}t\right)\right) + \frac{m}{q|\mathbf{B}|} \mathbf{v}_x(0) \sin\left(\frac{q|\mathbf{B}|}{m}t\right) + X_0 \quad (26)$$

$$Y = -\frac{m\varphi}{q|\mathbf{B}|^2l} \sin\left(\frac{q|\mathbf{B}|}{m}t\right) + \frac{m}{q|\mathbf{B}|} \mathbf{v}_x(0) \left(1 - \cos\left(\frac{q|\mathbf{B}|}{m}t\right)\right) + \left(\frac{\varphi}{|\mathbf{B}|l} + \mathbf{v}_y(0)\right)t + Y_0 \quad (27)$$

式中 X 和 Y 是带电粒子的轨迹， X_0 和 Y_0 表示离子在放电状态中的初始位置。

联立上述电磁场控制方程、击穿场控制方程、电路结构参数控制方程、流固传热控制方程、热力膨胀方程以及带电粒子受力方程 6 个方程，即可

得到动态损伤模型，实现多物理场的耦合，以模拟电脉冲破岩的数值模拟。

在模拟的过程中，不同磁场状态下所述岩石的损伤分布情况可以包括以下模拟：

（一）模拟磁场（自激磁场）对电脉冲破岩的影响（击穿通道和等离子体通道）

基于上述动态损伤模型，分别考虑在有磁场和无磁场环境下进行电脉冲破岩数值仿真模拟，并分析其对岩石内部等离子通道形成的影响。通过在电极钻头上施加特定脉冲上升前沿时间和电压的高压电脉冲，观察岩石的损伤分布情况以及等离子通道分布情况，以确定磁场对电脉冲破岩的影响，为电脉冲破岩技术的发展提供技术和理论指导。

（二）模拟外磁场（磁体）对电脉冲破岩的影响（击穿通道和等离子体通道）

基于上述动态损伤模型，分别考虑在设置外加磁场和无外加磁场环境下进行电脉冲破岩数值仿真模拟，并分析其对岩石内部等离子通道形成的影响。通过在岩石旁放置磁体，磁体的磁感应强度远大于自磁场的最大磁感应强度（自磁场的最大磁感应强度通过步骤（一）中电磁场控制方程，最终通过 COMSOL 软件得到）。重复步骤 1-3，建立电脉冲破岩数值仿真模拟，分析在外磁场环境（磁体）下，其对岩石内部等离子通道形成的影响并观察岩石的损伤分布情况。

上述模拟（一）和模拟（二），可以用于探究分析磁场对电脉冲破岩的影响机理。在探索其影响产生的机理时，可以重复模拟（一）和模拟（二），利用 COMSOL 软件，观察等离子通道形成的时候，通过等离子通道划分岩石击穿阈（出现岩石损伤的区域），并通过岩石击穿阈建立了带电粒子束的简单运动轨迹模型。在模拟（一）中，分别观察在有磁场和无磁场环境下等离子通道的形成时间，通过 COMSOL 带电粒子模拟模块，在等离子通道的形成时间前，通过模拟（一）所提及的带电粒子受力方程，观察带电

粒子的运动情况及分布情况，以分析磁场对电脉冲破岩的影响机理。

上述模拟（一）步骤还可以用于探究在不同电压下产生的磁场（自激磁场）对电脉冲破岩的影响，并进行优化设计。其具体操作可以为：基于上述模拟（一）的方法，分析在自磁场环境 and 无磁场环境下的电脉冲破岩数值仿真模拟，进行不同工况（电压）下的数值模拟；在不同电压的情况下，进行电脉冲破岩效果对比以及观察其对等离子通道的分布影响，进而对电脉冲破岩数值模型进行优化设计。

上述模拟（二）步骤还可以用于探究在不同外磁场（磁体）情况下对电脉冲破岩的影响，并进行优化设计。其具体操作可以为：基于上述模拟（二）的方法，在不同工况（磁体的磁感应强度大小）下进行数值模拟；在不同磁感应强度下，进行电脉冲破岩效果对比以及观察其对等离子通道的分布影响，进而对电脉冲破岩数值模型进行优化设计。

上述模拟（二）步骤还可以用于探究在不同外磁场（磁体）情况下对带电粒子运动的影响，并进行优化设计。其具体操作可以为：基于上述模拟（二）的方法，在不同工况（磁体磁感应强度大小）下进行带电粒子运动模拟，在不同磁体作用下进行带电粒子运动分析对比，进而对电脉冲破岩数值模型进行优化设计。

为了得到更有效的模拟模型，发明人还提供了一种优化方案，其具体为：

对相同切削参数下，利用局部高温诱导致裂辅助电极钻头切削破岩模型的模拟结果与传统电极钻头切削及热致裂辅助切削室内试验的破岩效果进行对比，并根据对比结果判断局部高温诱导致裂辅助电极钻头切削破岩模型的有效性，如局部高温诱导致裂辅助电极钻头切削破岩模型的模拟结果与辅助切削室内的试验结果误差在 5% 以内，则认为数值模型可靠，通过验证；若局部高温诱导致裂辅助电极钻头切削破岩模型与辅助切削室内的试验结果误差在 5% 以上，则改变岩石材料的弹性模量、泊松比、内摩擦角

等矿物材料力学参数，并重复上述步骤 S2~S7，得到新的局部高温诱导致裂辅助电极钻头切削破岩模型，并再次进行验证、判断，直至误差低于 5%。

为了更好的说明本申请所提供的一种高压电脉冲破岩数值模拟方法，便于本领域的技术人员理解该方法的技术效果，下面通过一个例子来具体说明。

该目标岩层为花岗岩地层、待用电极钻头（高压电极和接地电极）为尺寸高度 10mm，宽度为 2mm，建立尺寸合适的岩石有限元模型高度为 10mm，长度为 40mm，水域范围为长度为 80mm，高度为 30mm 为了防止电极在非端部的电泄露，高压电极和接地电极被绝缘介质（如尼龙）包裹如图 1 所示。建立岩石有限元模型，并对电极钻头与岩石接触地方以及岩石进行网格细化，细化区域大小为 10mm×16mm，并对细分区域进行材料参数和力学参数赋值，使岩石力学性能与花岗岩的实际情况一致，建立基于 Voronoi 的非均质岩石有限元模型，如图 2 所示；其赋值的材料参数和力学参数如图 3（a）~3（h）所示。

在 COMSOL Multiphysics 中建立与所述非均质岩石有限元模型的外形尺寸、空间坐标一致的岩石几何模型；并将包含有材料参数和力学参数的所述插值函数导入 COMSOL Multiphysics 中的岩石模型，并根据电脉冲破岩的基本理论建立相关控制方程，建立动态损伤模型，然后进行高压电脉冲破岩数值模拟。

其具体模拟过程示例如下：

S1：首先进行无磁场环境下的电脉冲破岩数值模拟，通过在电极钻头上施加特定脉冲上升前沿时间 5200ns 和电压 55kv 的高压电脉冲，获得岩石的损伤分布，以及等离子通道的情况；然后，在自磁场环境下再次进行同样操作，得到无磁场环境下和自磁场环境下的电脉冲破岩效果对比图，如图 4。

S2 在 S1 的基础上，得到电脉冲破岩的最大磁感应强度为 4.77T，4.77T

为那一时刻的最大磁感应强度，在电脉冲破岩整个期间都小于此磁感应强度。因此在模型中加入磁体为 5T 的磁感应强度，以模拟外磁体对电脉冲破岩的影响，磁体 5T 磁感应强度在整个电脉冲破岩期间都大于自激磁场产生的磁感应强度，因此自激磁场强度忽略不计。在外磁场情况下的电脉冲破岩模拟结果，如图 5，需要说明的是，在该图中，为了清楚对比磁场效应对电脉冲破岩的影响情况，下面加了一个 4T 外磁场，可以方便观察出影响规律。

S3，在 S1 中观察等离子通道的形成时间，发现当电流为 1kA 时，等离子通道恰好形成，并测得此时对应的磁感应强度为 0.25T。在电压为 55kv 下的电脉冲破岩模拟，电子和正离子的模拟量均为 20000，模拟周期为 100ps，并不考虑期间新的带电粒子的产生。首先进行无磁场环境下的带电粒子运动情况数值模拟，获得带电粒子的分布情况以及带电粒子的速度情况；然后再自磁场环境下再次进行同样操作，获得带电粒子的分布情况以及带电粒子的速度情况，图 6 表示为带电粒子的分布情况和图 7 表示为带电粒子的速度情况。

S4：在 S1 的基础上，分析在自磁场环境和无磁场环境下的不同电压 (55kv,60kv,65kv)的电脉冲破岩效果以及等离子通道分布，如图 8。

S5，为了更加清晰的分析出外磁场对电脉冲破岩效果的影响以及对等离子通道的影响，加入 4T 磁感应强度进行分析，如图 5。

S6：在 S3 的基础上，探究外磁场对带电粒子的分布情况以及带电粒子的速度情况，分别引入 0.5T、0.7T、0.9T 磁感应强度，如图 9。

通过上述模拟，发现，电脉冲破岩数值模拟中，磁场物理场的加入，将使电脉冲破岩击穿深度更深，且有次等离子通道的生成。在外磁场（磁体）的作用下，随着磁体的磁感应强度增大，等离子通道呈现出向下发展的趋势，这样有利于等离子通道的能量释放，使电脉冲破岩效率更高，击穿通道变得更深。并且可以通过模拟带电粒子运动发现，在有磁场环境下

（自激磁场和外磁场），带电粒子的运动（速度和位移）受到限制，且出现往下堆积的现象，这与次等离子通道的生成和主等离子通道向下发展密切相关。

因此磁场物理场的加入，使电脉冲破岩数值模型更加精确，在电脉冲破岩过程中，可以考虑加入强磁体，进行电脉冲破岩作业，可以使电脉冲破岩产生的击穿深度更加深。本研究可为电脉冲破岩技术的发展提供一定的理论指导和技术指导，为电脉冲破岩工具的研制和参数优化提供了参考。

以上实施例的说明只是用于帮助理解本发明的方法及其核心思想，应当指出，对于本技术领域的普通技术人员来说，在不脱离本发明原理的前提下，还可以对本发明进行若干改进和修饰，这些改进和修饰也落入本发明权利要求的保护范围内。

最后应说明的是：以上各实施例仅用以说明本申请的技术方案，而非对其限制；尽管参照前述各实施例对本申请进行了详细的说明，本领域的普通技术人员应当理解：其依然可以对前述各实施例所记载的技术方案进行修改，或对其部分或全部技术特征进行等同替换；而这些修改或替换，并不使相应技术方案的本质脱离本申请各实施例技术方案的范围。