

# 考虑电性参数变化的高压电脉冲破岩机理及规律

饶平平<sup>1</sup>, 焦大维<sup>1</sup>, 崔纪飞<sup>1</sup>, 冯伟康<sup>2</sup>

<sup>1</sup>上海理工大学环境与建筑学院, 上海

<sup>2</sup>同济大学上海自主智能无人系统科学中心, 上海

收稿日期: 2024年11月24日; 录用日期: 2024年12月19日; 发布日期: 2024年12月26日

## 摘要

为研究高压电脉冲击穿过程对岩石破碎的影响, 综合考虑击穿过程中岩石电导率和介电常数变化对电击穿作用的影响, 利用COMSOL Multiphysics仿真软件建立了基于电场、传热场和固体力学场的多物理场耦合数值模型。结果表明: 在本文参数条件下, 考虑电性参数(电导率和介电常数)变化带来的影响时, 形成完整的电击穿通道的时间发生延迟, 且在约0~170 ns时间内电性参数变化对应的最高温度不高于电性参数为定值对应的最高温度, 在约170 ns之后则相反。电极间距不同, 电脉冲形成的击穿通道形式不同, 最大电流密度随电极间距增大而减小, 击穿通道温度可达 $10^4$  K。电压上升到达峰值的时间越长, 岩石的破碎越充分, 最大应力可达 $10^3$  MPa。研究结论可为高压电脉冲破岩参数的选取提供参考和借鉴。

## 关键词

高压电脉冲, 多场耦合, 电性参数, 岩石破碎

# Rock Breaking Mechanism and Rule of High Voltage Electric Pulse Considering the Change of Electrical Parameters

Pingping Rao<sup>1</sup>, Dawei Jiao<sup>1</sup>, Jifei Cui<sup>1</sup>, Weikang Feng<sup>2</sup>

<sup>1</sup>School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

<sup>2</sup>Shanghai Research Institute for Intelligent Autonomous Systems, Tongji University, Shanghai

Received: Nov. 24<sup>th</sup>, 2024; accepted: Dec. 19<sup>th</sup>, 2024; published: Dec. 26<sup>th</sup>, 2024

## Abstract

To investigate the impact of high-voltage electrical pulse breakdown on rock fragmentation and

changes in rock conductivity and dielectric constant during breakdown, a multi-physics coupling numerical model based on electric field, heat transfer field, and solid mechanics field was established using COMSOL Multiphysics simulation software. The results indicate that considering changes in electrical parameters (electrical conductivity and dielectric constant) delays the time required to form a complete electrical breakdown channel. Moreover, the maximum temperature corresponding to changes in electrical parameters does not exceed that corresponding to fixed values by more than 0~170 ns; however, after approximately 170 ns, this relationship reverses. The maximum current density decreases as electrode spacing increases while the temperature within the breakdown channel can reach up to  $10^4$  K. Longer voltage rise times result in complete rock fragmentation with maximum stress reaching up to  $10^3$  MPa. These research findings provide valuable guidance for selecting optimal.

## Keywords

High-Voltage Electrical Pulse, Multifield Coupling, Electrical Parameter, Rock Breakage

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

近年来,石油及天然气等化石能源开采深度逐渐增加。传统机械式钻井技术是目前的主流技术,但随着开采难度的继续增大,当前传统机械钻井破岩法因为效率、成本、环保等因素已越来越难以满足未来工程实际应用的需要,迫切需要研究新型高效破岩技术以解决复杂地质条件带来的钻探成本高、钻头失效严重、破岩效率低等问题[1]-[3]。高压电脉冲破岩技术通过施加高压电脉冲,实现对岩石的快速有效破碎,显著提高生产效率,同时减少环境污染和资源浪费[4]。其良好的定向性和灵活的参数调整能力,使得操作人员能够针对不同岩石特性和工程需求,优化破碎效果,推动矿业开发和工程建设的可持续发展。

针对高压电脉冲破岩技术的研究始于上世纪 50 年代,随着研究的不断深入,逐渐演变成为一种具有显著工程应用潜力的新型破岩钻井方法[4]-[6]。高压电脉冲破岩技术通过高压电脉冲在岩石内产生电场,促使介质产生电击穿形成等离子通道,产生的高压冲击波进一步扩展击穿通道,实现岩石破碎。该技术利用电场、温度和冲击波相结合的效应,在复杂地质条件下具有较大应用潜力。高压电脉冲破岩技术通过对介质施加高压电脉冲,造成多物理场耦合的复杂电击穿破碎过程,其作用机制可归纳为电破碎与液电破碎两种形式[7] [8]。当电脉冲电压的上升时间控制在 500 ns 以内时,介质的击穿场强大小依次为水最大,岩石次之,最低为空气。采用水作为绝缘介质,电极直接接触岩石,通过电脉冲作用实现岩石破碎,这一类型的破碎过程即为电破碎。当电压的上升时间超过 500 ns,击穿场强从大到小依次排列为岩石、水和空气,此时破碎方式为液电破碎。破碎形式以电破碎为主时,等离子通道形成所产生的温度效应和力学效应直接作用于岩石内部。在高压电脉冲作用下,岩体电导率可在极短时间内提升至初始值的  $10^4$  倍,等离子通道的半径尺寸可瞬间扩张  $10^3$  倍[9],产生的应力超过岩石的抗拉强度导致岩石发生张拉破坏。利用液电效应破岩时,放电电极浸入液体绝缘介质,未直接接触岩石。等离子通道形成于液体绝缘介质中,使电场强度达到液体的击穿阈值,形成放电通道。放电过程中,液体中会产生高温和高压的等离子体气泡,这些气泡在膨胀和崩溃过程中产生强烈的压力波[10]。这些压力波在传播时对固体施加瞬时高压,导致其产生裂纹并最终被破碎。液电破碎技术以其非机械接触的特点,有效降低了机械磨损,广泛应用于矿物粉碎及废物处理等领域。电破碎为直接破碎,液电破碎为间接破碎。电破碎能使岩石达到

充分破碎且能耗低于液电破碎，破岩效率较高。

尽管高压电脉冲破岩技术在提升岩石破碎能效方面表现出显著优势，并为新型绿色高效钻井技术的发展提供了有力支持，然而其破岩过程作用时间极短，岩石内部温度、场强等物理量难以被准确测量，破岩机理难以被准确描述。目前尚未有业界广泛公认的准确多物理场耦合破岩机理及数值模型，在一定程度上影响了高压电脉冲破岩技术的工业化应用。针对这一问题，研究者们已经开展了大量理论和实验研究，集中探讨高压电脉冲的电击穿过程及其与破岩模型之间的关系。这些研究旨在深化对破岩机理的理解，并为相关技术的实际应用提供理论支持和技术指导。Andres 等[11]通过大量实验研究发现，脉冲电压上升时间  $t_r$  缩短时，固体和液体的击穿电压均会升高。此外，不同介质的击穿电压  $E_{br}$  与脉冲上升时间  $t_r$  之间的关系表现出显著差异。实验结果进一步揭示，随电压上升时间变化，绝缘介质与岩体击穿场强的曲线存在交点  $t_0$ 。当电压上升时间  $t_r$  小于  $t_0$  时，岩石的击穿强度显著降低，从而提高了形成等离子放电通道的可能性。Liu 等[12]模拟孔隙存在时电击穿通道的形成规律，但所建模型中未考虑温度场的影响。章志成等[13]在去离子水中开展了电脉冲破岩实验，结果表明岩石孔隙率的变化对击穿场强有显著影响，随着岩石孔隙率的增加，其击穿场强呈减小趋势。白丽丽[14]通过建立仿真模型研究高压电脉冲作用下多孔岩石内部的电场强度分布特性，指出孔隙是影响电击穿和电场强度分布的重要因素。研究结果表明，电击穿最可能首先发生在岩石的孔隙缺陷部位，但该研究未考虑电性参数变化对电击穿过程的影响。Wang [15]等采用 COULOMB 3D 软件模拟不同颗粒条件下岩石内部的电场强度分布规律，得到矿物组成和电导率变化对岩石内部电场分布的影响。

综上所述，当前尚未建立广泛认可的高压电脉冲破岩仿真模型，特别是在多物理场耦合条件下对高压电脉冲破岩过程及等离子体通道形成机制的研究相对不足。在电破碎过程中，电场、温度和机械应力等多种物理量互相影响且变化迅速，使得岩石在破碎过程中的行为难以描述。这种复杂性影响了理论模型的构建，也限制了实验数据的获取和验证，阻碍了高压电脉冲破岩技术的进一步发展。此外，现有研究大多也未能充分考虑在多场耦合作用条件下岩石在电击穿过程中电性参数随电场强度的变化的影响。基于此，本文在国家自然科学基金资助项目(42077435, 42377171)支持下，提出了一种新型电击穿模型，旨在通过多物理场耦合技术模拟单次高压脉冲下的电击穿过程。该模型考虑电场、温度和机械应力等物理场的相互作用，并综合分析击穿过程中电导率和介电常数的变化对电击穿行为的影响。该模型可建立破岩机破岩参数与破岩效率之间的关系，为破岩机及破岩工具的研制和参数优化提供实用方法。

## 2. 电脉冲破岩机理分析

### 2.1. 电脉冲破岩过程

高压电脉冲破岩过程可分为三个阶段[16]。初期阶段中岩石在电脉冲作用下被注入能量，岩石内部的电场强度因此迅速增大，此时会有少量等离子体产生。在等离子通道形成阶段中，岩石在持续的高压电脉冲冲击下发生电击穿，形成等离子体区域。随着电脉冲的继续作用，这些等离子体逐步扩展并连接，构成初步的等离子通道，导致岩石内部形成初始裂缝结构。该阶段的通道扩展与裂缝生成为后续的高效破碎创造了条件。岩石破碎阶段则通过将高压电脉冲电流持续注入初步形成的等离子通道，进一步提高了通道的温度。通道内高温加剧了局部热应力，并在岩体周围产生强烈的高压冲击波。冲击波促使岩石内部的微裂纹扩展和贯通，形成完整的贯穿通道，从而实现岩石的高效电破碎。

### 2.2. 电流场方程

使用麦克斯韦方程组描述高压电脉冲破岩过程中的时变电场状态：

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = \frac{\partial \rho_d}{\partial t} \quad (1)$$

$$\mathbf{J} = \mathbf{J}_c + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (2)$$

$$\mathbf{E} = -\nabla \varphi \quad (3)$$

$$\mathbf{J}_c = \sigma_c \mathbf{E} \quad (4)$$

$$\mathbf{D} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \mathbf{E} \quad (5)$$

其中： $\mathbf{J}$ 为全电流密度，其散度恒等于0，即 $\nabla \mathbf{J} = 0$ ， $\mathbf{J}_c$ 为传导电流， $\mathbf{D}$ 为电位移， $\mathbf{E}$ 为电场强度， $\rho_d$ 为电荷密度， $t$ 为时间， $\varphi$ 为电势， $\sigma_c$ 为电导率， $\varepsilon_0$ 为真空介电常数， $\varepsilon_r$ 为介质相对介电产生常数。由麦克斯韦方程组可得电势控制方程：

$$\varepsilon_0 \varepsilon_r \nabla^2 \frac{\partial \varphi}{\partial t} + \sigma_c \nabla^2 \varphi = 0 \quad (6)$$

电击穿过程中会发生多种电学参数的改变，这些参数都会影响电流在岩体中的传导，进而影响电击穿的产生和击穿路径的发展，故构建模型时应充分考虑不同参数的变化。当存在电流作用时，岩石内部场强开始发生改变，岩石的导电性质也发生变化，主要体现为电导率和介电常数的改变。岩石的初始电导率和介电常数均由自身物理性质决定。Zhu等[17]的研究结果发现，当岩石在高压电脉冲的作用下部分区域电场强度达到击穿场强，在此过程中该部分岩体的电导率激增，介电常数也会增大，电学性质由最初的电阻转变为导体。结合文献[18]的研究结果，岩石电导率在电击穿过程中的变化可描述为：

$$\begin{cases} E_p < E_{pc}, e_1 \\ E_{pc} < E_p < E_{ps}, \frac{e_2 \cdot (E_p - E_{pc})}{E_{ps} - E_{pc}} \\ E_p > E_{ps}, e_2 \end{cases} \quad (7)$$

式中 $E_{pc}$ 和 $E_{ps}$ 分别指岩石的起始击穿电场强度和完全击穿电场强度，单位为V/m。 $e_1$ 和 $e_2$ 分别表示岩石的初始电导率和完全击穿后的电导率，单位为S/m。击穿过程中岩石内部电场强度不断增加，当电场强度达到 $E_{pc}$ 时，岩石电导率开始随电场强度增大而增大，岩石也开始逐渐向导体转变；当电场强度增大到完全击穿电场强度 $E_{ps}$ 时，等离子通道完全形成。

根据Zhu等[19]的研究结果，击穿过程中岩石的介电常数的变化可描述为：

$$\begin{cases} \varepsilon_{\max}, E_p \geq E_{ps} \\ \frac{E_p - E_{pc}}{E_{ps} - E_{pc}} \times (\varepsilon_{\max} - \varepsilon_{\min}), E_{pc} < E_p < E_{ps} \\ \varepsilon_{\min}, E_p \leq E_{pc} \end{cases} \quad (8)$$

当岩石内部电场强度小于起始击穿场强时，岩石不会发生击穿，岩石内部的相对介电常数为 $\varepsilon_{\min}$ ，此时岩石内部没有发生损伤。当岩石内部电场强度大于完全击穿场强时局部区域完全发生电击穿，形成一些等离子体通道分支，此时被击穿区域的相对介电常数增大为 $\varepsilon_{\max}$ 。在电脉冲击穿过程中， $\varepsilon_{\min}$ 与 $\varepsilon_{\max}$ 分别为介电常数的下限和上限。

### 2.3. 电击穿过程中的热效应

由麦克斯韦方程组可知，电流包含传导电流和位移电流。位移电流的本质是变化的电场，故在电脉

冲破岩过程中不产生焦耳热；传导电流由电荷的定向移动形成，可在介质中产生电流的热效应。高压脉冲电流经电极作用于岩体，电流以传导电流的形式在岩石内部形成等离子通道并释放大量热量。焦耳热  $Q$  可表示为：

$$Q = |\mathbf{J}_c| \cdot |\mathbf{E}| = (\nabla V)^2 \sigma_c \quad (9)$$

其中， $|\mathbf{J}_c|$  为传导电流密度矢量的大小，单位为  $\text{A}/\text{m}^2$ ； $|\mathbf{E}|$  为电场强度矢量的大小，单位为  $\text{V}/\text{m}$ ，单位为  $\text{A}/\text{m}^2$ ； $Q$  为焦耳热源，单位为  $\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

考虑传热效应，控制方程为主动传热方程，可表示为：

$$c_p \rho \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla(\lambda \Delta T) = Q \quad (10)$$

式中  $c_p$  为恒压热容量，单位为  $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ； $\rho$  为密度，单位为  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ； $T$  为温度，单位为  $\text{K}$ ； $\lambda$  为热传导系数。将式(9)带入式(10)，可得：

$$c_p \rho \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla(\lambda \Delta T) = (\nabla V)^2 \sigma_c \quad (11)$$

## 2.4. 力学场方程

高压电脉冲作用于岩体时，电流将能量注入岩石形成等离子体通道，电脉冲继续作用使等离子通道体积扩张，岩石内部应力持续增大，当应力超过岩石的单轴抗拉强度(10~30 MPa)，岩石即可出现力学损伤。由于高压电脉冲破岩过程的作用时间极短，岩体峰前应力应变关系可简化为线弹性关系，即满足以下方程：

$$\begin{cases} \varepsilon = \frac{1}{2} [(\nabla \mathbf{u})^T + \nabla \mathbf{u}] \\ \mathbf{C} = \mathbf{C}(\mathbf{E}, \nu) \\ \boldsymbol{\sigma} = \mathbf{C} : \varepsilon \end{cases} \quad (12)$$

式中， $\mathbf{u}$  为位移场变量， $\boldsymbol{\sigma}$  为热应力(Pa)， $\mathbf{C}$  为各向同性弹性矩阵，由材料弹性模量和泊松比控制； $\varepsilon$  为应变，表示为：

$$\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_T \quad (13)$$

式中  $\varepsilon_e$  和  $\varepsilon_T$  分别为有效应变和热应变。电流热效应引起的热应变  $\varepsilon_T$  为：

$$\varepsilon_T = \alpha [T(t) - T_0] \quad (14)$$

式中  $\alpha$  为物质热膨胀系数，单位为  $\text{K}^{-1}$ ； $T(t)$  为等离子通道温度，单位为  $\text{K}$ ； $T_0$  为初始温度，单位为  $\text{K}$ 。

## 2.5. 各物理场耦合关系

在电脉冲破岩过程中，高压电流的持续施加会导致岩石内部形成等离子体通道。这一现象不仅引起了局部应力的显著变化，还伴随大量热量的释放，进而影响岩石的力学特性。热量的释放导致岩石温度急剧上升，从而产生热膨胀和热应力，这对岩石的物理及化学性质造成了影响。此外，等离子体通道的迅速扩展产生强烈的冲击波，这些冲击波在传播过程中对岩石施加了额外的动态压力，进一步增强了岩石的破坏。图 1 为表述该过程中电-热-力多物理场耦合关系的示意图。其中， $E_k$ ， $J_k$ ， $\sigma_k$  分别表示为介质临界电场强度，临界电流密度和临界应力强度。

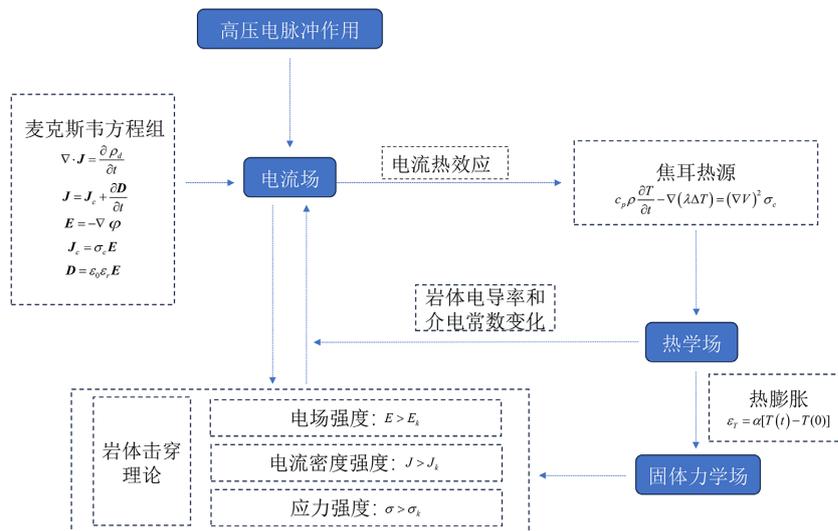


Figure 1. Electrical-thermal-mechanical coupling of multiple physical fields  
图 1. 电 - 热 - 力多物理场耦合关系

### 3. 仿真模型构建

#### 3.1. 二维电脉冲破岩模型

利用有限元模型 COMSOL Multiphysics 建立岩石二维电击穿破岩模型，模拟岩石在电 - 热 - 力多物理场耦合作用下的电击穿过程。Timoshkin 等[4]、Kusaiynov 等[20]、Yudin 等[21]、Li 等[22]都对电极钻头的结构进行了设计，共同特点是电极钻头由一对或多对电极组成，电极对平行放置或者互相成一定的倾斜角度放置，定义一个电极对为电极钻头的一个基本破岩单元。模型中高压电极与接地电极平行放置，电极与岩石表面接触，高压电极与接地电极位于岩石的同一侧。可从双电极处进行剖分将三维空间问题简化分析，如图 2 所示，电极间距  $L = 25 \text{ mm}$ ，岩石宽度  $W = 50 \text{ mm}$ ，厚度  $H = 30 \text{ mm}$ 。为消除反射波干扰，设置模型边界为低反射边界。电极材料设置为理想导体，周围环绕绝缘套筒。绝缘部分的电击穿强度须大于岩石的电击穿强度以保证绝缘套筒不发生击穿破坏。为简化模型，模拟中的放电次数为 1，采用瞬态静电场模拟该过程。电极与绝缘材料的各项参数如表 1 所示，岩体基本参数如表 2 所示。

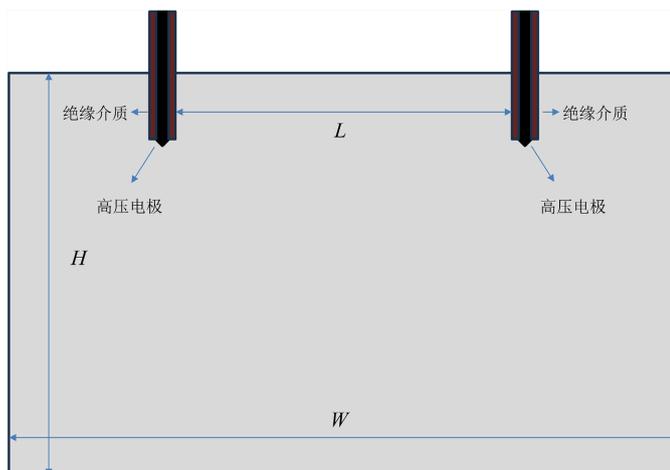


Figure 2. Two-dimensional electric pulse rock breaking model  
图 2. 二维电脉冲破岩模型

**Table 1.** Material parameters of electrode and insulating medium**表 1.** 电极和绝缘介质的材料参数

材料/参数	电导率/(S/m)	相对介电常数	比热容/(J·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	导热系数/(W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )
电极	5.7 × 10 <sup>7</sup>	1	385	400
绝缘介质	0	4	1700	0.26

**Table 2.** Rock mass parameter**表 2.** 岩体参数

岩体属性	数值
相对介电常数	12.0
电导率/10 <sup>-5</sup> (S/m)	4.5
比热容/(J·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	711
热膨胀系数/10 <sup>-5</sup> (K <sup>-1</sup> )	0.75
导热系数/(W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	2.34
密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	2630
弹性模量/(GPa)	53.0
泊松比	0.13

### 3.2. 矿物颗粒分布

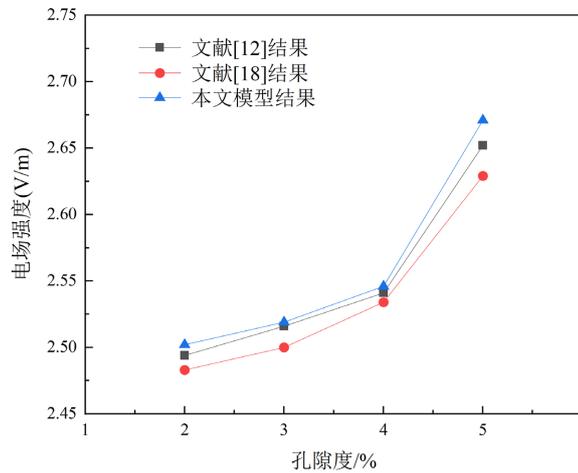
岩石内部存在的不同物质和孔隙都会影响电击穿的产生和发展。其中液体、气体和矿物颗粒对破岩过程的影响主要源自物质各自的电性参数不同。为进一步研究岩石内部矿物颗粒的存在对电脉冲作用的影响,假定一个二维矩形岩域的内部存在导体矿物颗粒物质,建立仿真模型并考虑颗粒异质性对电脉冲破岩过程中等离子体通道形成和发展的影响。将导体颗粒设置为椭圆形和圆形两种,互不接触,均匀分布且位置随机。导体颗粒电学参数设为相同。分布规律参考 Renshaw [23]对裂缝在岩体中的定义,分布系数 $\chi$ 满足:

$$\chi = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^n \left[ \frac{2\pi b_i + 4(a_i - b_i)}{2} \right] + \frac{1}{A} \sum_{j=1}^m \left( \frac{2\pi a_j}{2} \right) \quad (15)$$

式中  $n$  和  $m$  分别表示椭圆和圆形颗粒的数量,在本文模型中分别为 45 和 15;  $A$  表示二维岩体域的面积;  $a_i$ ,  $b_i$  和  $a_j$  分别表示椭圆形颗粒的长半轴长度,短半轴长度和圆半径长度。

### 3.3. 模型验证

为验证本文模型的准确性,对模型计算结果与实验数据及相关数值模拟结果进行对比分析。本文模型与文献[12]施加高压电脉冲时间等参数保持一致,电压峰值统一设为 120 kV;初始温度为 293.15 K。本文将岩体内部颗粒视为孔隙,孔隙度分别为 2%, 3%, 4%, 5%。仿真结果与文献[12]及文献[18]所得结果对比如图 3 所示,通过比较不同孔隙度的岩石对应高压电脉冲过程中电场强度最大值的变化,可验证模型的正确性。



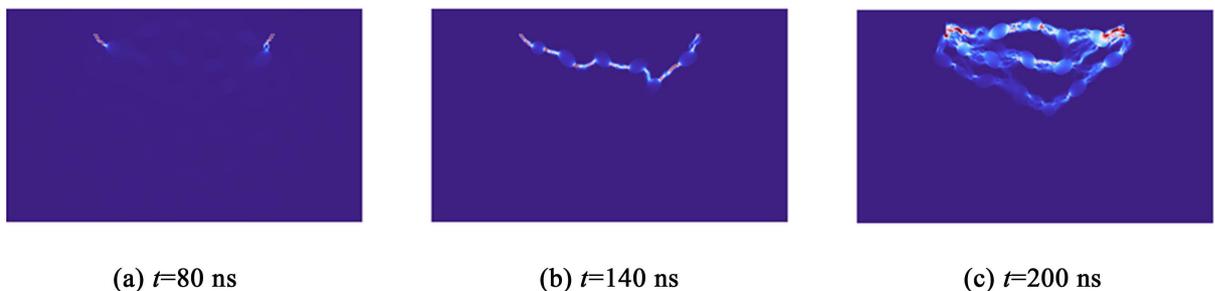
**Figure 3.** Maximum initial breakdown electric field intensity with different porosity  
**图 3.** 不同孔隙度最大起始击穿电场强度

#### 4. 结果分析

在外界脉冲电压的激励下岩石受到强电场作用，当岩石内部电场强度足够大时，会在固体介质中诱发极化效应，此时介质的分子或晶格结构发生变形。这种变形可能导致介质物理性质的变化，甚至引起初始损伤。岩石颗粒中的电子在外加电场的作用下获得能量并加速成为高能电子，不断轰击剩余的带电粒子。在这些碰撞中，高能电子可以从原子或分子中剥离其他电子，使它们脱离原子或分子，成为自由电子。这种电离过程可能导致材料电离产生等离子体，从而影响材料的电导率和化学性能。随着岩石局部绝缘特性逐渐消失，高压电极与地电极之间出现贯通的导电通道，岩石将发生电击穿。

本文进行的仿真实验中，脉冲输出电压范围设定在 25~200 kV 之间。值得注意的是，本文研究的对象为花岗岩，在岩石破碎过程中没有考虑岩屑的移动，忽略了热对流对传热的影响。此外，本文没有考虑能量形式的转换(即电能转换为光能和声能等形式)。

图 4 所示为在外加脉冲电源的通电作用下，电极间距为 20 mm，电极端电压上升时间为 200 ns，电极电压峰值为 30 kV 的条件下岩石中等离子体通道形成过程示意图。在电脉冲作用过程中电压在 200 ns 达到峰值，同时电场强度迅速上升，岩石局部位置电场强度可达  $10^6$  V/m 以上，最大电流密度可达  $10^9$  A/m<sup>2</sup> 以上。当  $t$  在 0~80 ns 时，颗粒周围部分岩体开始出现电损伤。当  $t$  在 80~140 ns 时，在电流的持续作用下岩石内部电场强度逐渐增大，岩石损伤区域也随之增大。当  $t$  在 140~200 ns 时，注入等离子通道的能量使通道进一步扩张，同时能量将转化为热应力和冲击波作用于岩石内部，对岩石造成破坏。当应力超过岩石的临界应力强度，岩石最终产生损伤完成电脉冲破岩。



**Figure 4.** Plasma channel formation process  
**图 4.** 等离子通道形成过程

图 5(a)表示考虑电性参数变化(电导率和介电常数)时,完整的电击穿通道在 100 ns 左右形成;图 5(b)表示不考虑电性参数变化时,完整的电击穿通道在 120 ns 左右形成。故当忽略击穿过程中电性参数变化,形成完整电击穿通道的时间发生延迟。图 6 表示 0~300 ns 时间内,在岩石的电击穿过程中电性参数的变化对岩体内部最高温度的影响。可得在 0~100 ns 阶段,考虑电性参数变化与否对岩石内部最高温度的影响并不明显,在 100~300 ns 阶段,考虑电性参数变化对应的最高温度升高的速度先慢于电性参数为定值对应的最高温度升高速度,随后快于电性参数为定值对应的最高温度升高速度。在约 170~300 ns 阶段,考虑电性参数变化对应的最高温度高于电性参数为定值对应的最高温度。

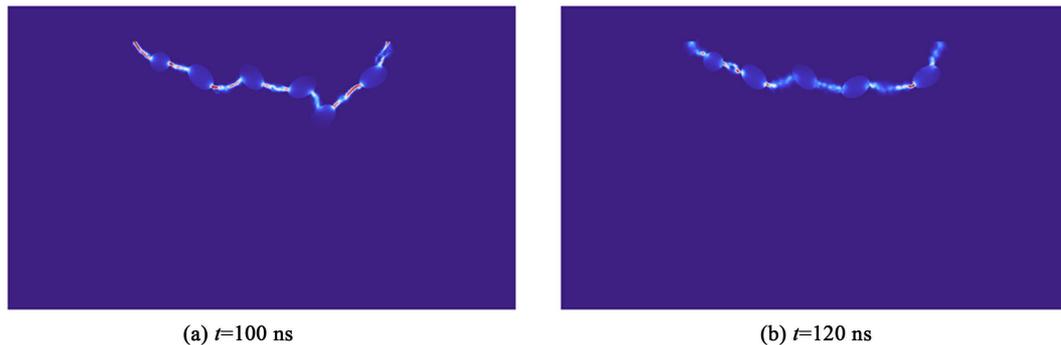


Figure 5. Effect of electrical parameter variation on formation time of complete breakdown channel  
图 5. 电性参数变化对完整击穿通道形成时间的影响

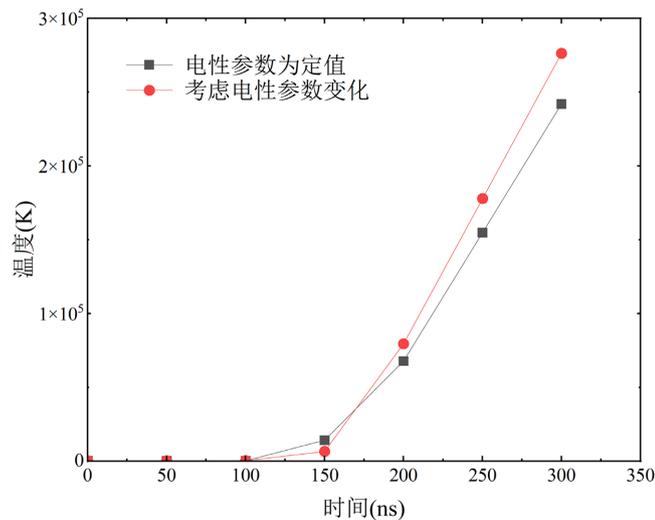


Figure 6. Effect of variation of electrical parameters on the maximum temperature during electrical breakdown  
图 6. 电性参数变化(电导率和介电常数)对电击穿过程中最高温度的影响

## 5. 影响因素分析

### 5.1. 电极间距对电脉冲破岩的影响

保持花岗岩成分和电脉冲参数不变,通过仿真模拟分析不同电极间距下的电场强度与应力的分布。电脉冲电压上升时间为 200 ns,峰值为 30 kV。正负电极间距范围为 20~30 mm,步长为 5 mm。

图 7 为 200 ns 时刻不同电极间距对应的岩石内部温度分布,从图 7 可以看出最高温度可达  $10^4$  K,随电极间距增大,岩石内部最大温度影响区域逐渐减小,等离子体通道的形成也变得越来越困难,等

离子体通道的数量逐渐减少，电脉冲作用影响的深度也在降低。图 8 为不同电极间距下岩石内部电流密度大小变化，电极间距越大，电极间电场形成越困难，电脉冲效应减弱导致击穿效果降低，最大电流密度随电极间距逐渐减小。因此，在电脉冲破岩设备设计中应在适当范围内优化电极间距以提高破岩效率。

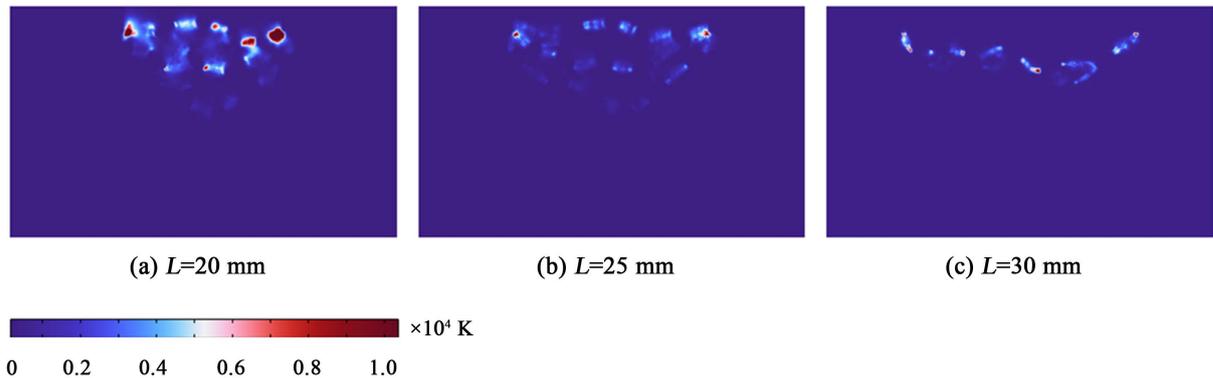


Figure 7. Effect of different electrode spacing on temperature distribution  
图 7. 不同电极间距对温度分布的影响

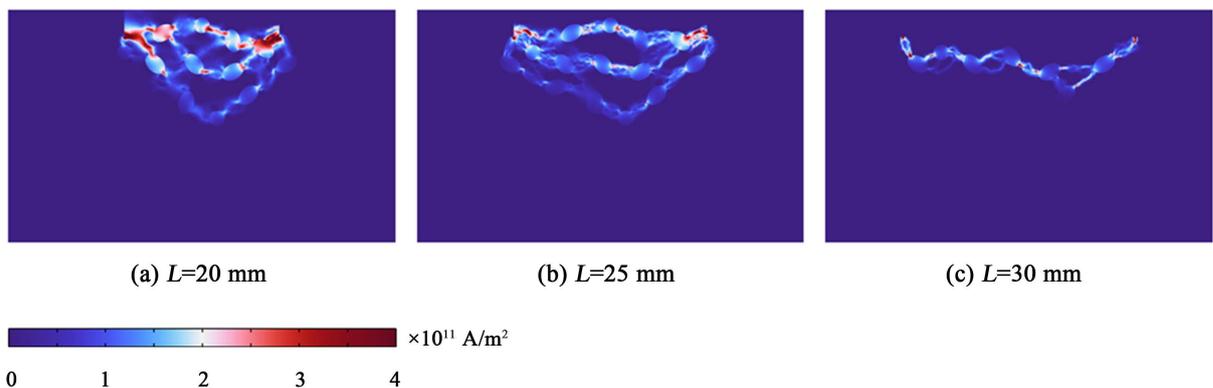
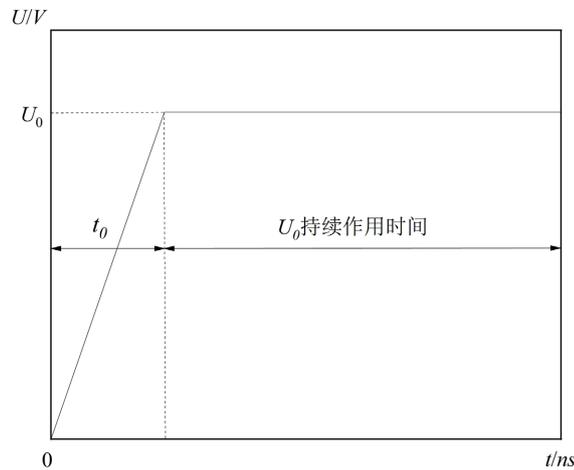


Figure 8. Effect of different electrode spacing on plasma channel  
图 8. 不同电极间距对等离子通道的影响

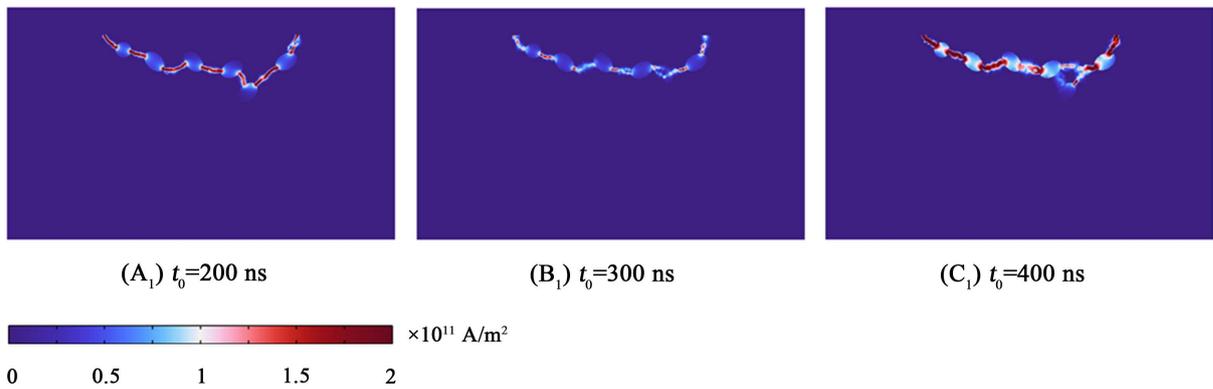
### 5.2. 电压上升时间对电脉冲破岩的影响

本文所建模型中，设置电压变化如图 9 所示。 $U_0$  为脉冲电压峰值， $t_0$  为电压上升到峰值的时间。不同电压峰值和脉冲时间在破岩过程中对等离子体通道的形成具有显著影响。电压峰值的变化会直接影响等离子体通道的强度与稳定性，从而影响其在岩石内部的传播特性。脉冲时间的长短则决定了电流作用于岩石的持续时间，进而影响热量的积累和应力的分布。这些因素的综合作用决定了岩石的破碎效果和处理效率。

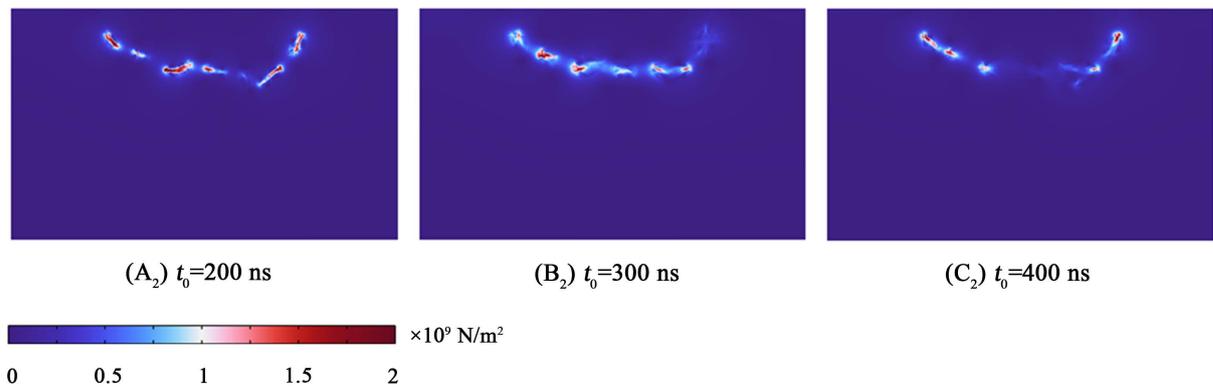
设置高压电脉冲峰值电压为 30 kV，电极间距为 25 mm，电压上升时间分别为 200 ns，300 ns，400 ns 模拟岩石破裂。图 10 和图 11 描述不同脉冲电压上升时间电脉冲作用产生完整等离子通道的形成规律。随着上升时间  $t_0$  在一定范围内的增大，电脉冲影响的范围越大，形成的击穿通道越多，越容易充分破碎岩石，击穿通道的电流密度可达  $10^{11}\text{ A/mm}^2$ 。产生的最大应力略有降低，但均超过岩石的临界应力，可达  $10^9\text{ N/m}^2$ ，足以造成岩石破坏。故在实际工程应用中可适当调整电压上升时间获得最优效果。



**Figure 9.** Pulse voltage waveform  
**图 9.** 脉冲电压波形



**Figure 10.** Influence of different voltage rise times on current density  
**图 10.** 不同电压上升时间对电流密度的影响



**Figure 11.** Influence of different voltage rise times on stress distribution  
**图 11.** 不同电压上升时间对应力分布的影响

## 6. 结论

本文基于非均质花岗岩模型，结合电学、热学和力学相关理论，利用 COMSOL Multiphysics 仿真软件建立有限元仿真模型模拟高压电脉冲破岩过程，研究在该过程中等离子体通道的形成规律。可得如下结论：

1) 考虑电性参数变化(电导率和介电常数)时,完整的电击穿通道在 100 ns 左右形成;不考虑电性参数变化时,完整的电击穿通道在 120 ns 左右形成。在 0~100 ns 阶段,考虑电性参数变化与否对最高温度的影响不明显,在约 0~170 ns 时间内电性参数变化对应的最高温度不高于电性参数为定值对应的最高温度,在约 170 ns 之后则相反。

2) 当电脉冲峰值电压  $U_0 = 30 \text{ kV}$ , 电压上升时间  $t_0 = 200 \text{ ns}$  时, 击穿时间在 0~80 ns 内, 颗粒处开始出现部分电损伤。当在 80~140 ns 时, 由于电流持续作用, 岩石内部电场强度逐渐增大, 岩石损伤区域也随之增大。当  $t$  在 140~200 ns 时, 注入通道的电能使通道进一步扩张, 同时能量将转化为热应力和冲击波作用于岩石内部, 当应力超过岩石的临界应力强度, 岩石损伤完成电脉冲破岩。

3) 双电极作用下随电极间距增大, 岩石内部最大温度逐渐减小, 最大电流密度逐渐减小, 击穿通道的数量逐渐减少, 电脉冲作用影响的深度降低, 两电极之间越难形成等离子通道。电脉冲作用的影响范围约为岩石长度的 1/3 到 1/2。

4) 当保持电脉冲峰值电压一定时, 在一定范围内脉冲电压上升时间越长, 形成的击穿通道数量越多, 越容易对岩石造成充分破碎, 在破碎过程中等离子通道的电流密度可达  $10^{11} \text{ A/mm}^2$ , 最大应力可达  $10^9 \text{ N/m}^2$ 。

## 基建项目

- 1) 国家自然科学基金面上项目: 高压电脉冲 - 机械联合破岩机理及力学性状研究(42377171)。
- 2) 国家自然科学基金面上项目: 土体雷电冲击致灾机理及力学性状演化规律研究(42077435)。

## 参考文献

- [1] 石林, 汪海阁, 纪国栋. 中石油钻井工程技术现状、挑战及发展趋势[J]. 天然气工业, 2013, 33(10): 1-10.
- [2] 李冬霜. 高压脉冲放电扩桩机理及试验研究[D]: [硕士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2011.
- [3] 左蔚然, 贺泽铭, 印万忠, 等. 多宝山铜矿石高压电脉冲破碎预处理试验研究[J]. 金属矿山, 2019(8): 71-77.
- [4] Timoshkin, I.V., Mackersie, J.W. and MacGregor, S.J. (2004) Plasma Channel Miniature Hole Drilling Technology. *IEEE Transactions on Plasma Science*, **32**, 2055-2061. <https://doi.org/10.1109/tps.2004.835489>
- [5] Inoue, H., Lisitsyn, I.V., Akiyama, H. and Nishizawa, I. (2000) Drilling of Hard Rocks by Pulsed Power. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, **16**, 19-25. <https://doi.org/10.1109/57.845023>
- [6] Ushakov, V.Y., Vajov, V.F. and Zinoviev, N.T. (2018) Relevance, Physical Basics, and Problems of Large-Scale Introduction of Electrodischarge Technology. In: Ushakov, V.Y., Vajov, V.F. and Zinoviev, N.T., Eds., *Electro-Discharge Technology for Drilling Wells and Concrete Destruction*, Springer International Publishing, 1-12. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-04591-3\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-030-04591-3_1)
- [7] Fujita, T., Yoshimi, I., Tanaka, Y., Jeyadevan, B. and Miyazaki, T. (1999) Research of Liberation by Using High Voltage Discharge Impulse and Electromagnetic Waves. *Shigen-to-Sozai*, **115**, 749-754. <https://doi.org/10.2473/shigentosozai.115.749>
- [8] Ezzat, M., Adams, B.M., Saar, M.O. and Vogler, D. (2021) Numerical Modeling of the Effects of Pore Characteristics on the Electric Breakdown of Rock for Plasma Pulse Geo Drilling. *Energies*, **15**, Article 250. <https://doi.org/10.3390/en15010250>
- [9] Budenstein, P.P. (1982) Failure Analysis of a Composite Insulation System under Impulse Excitation. 1982 *IEEE International Conference on Electrical Insulation*, Philadelphia, 7-9 June 1982, 131-136. <https://doi.org/10.1109/eic.1982.7464451>
- [10] Andres, U. (2010) Development and Prospects of Mineral Liberation by Electrical Pulses. *International Journal of Mineral Processing*, **97**, 31-38. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2010.07.004>
- [11] Andres, U.T. (1977) Liberation Study of Apatite-Nepheline Ore Comminuted by Penetrating Electrical Discharges. *International Journal of Mineral Processing*, **4**, 33-38. [https://doi.org/10.1016/0301-7516\(77\)90029-1](https://doi.org/10.1016/0301-7516(77)90029-1)
- [12] Liu, W.J., Zhang, Y.J., Zhu, X.H., et al. (2022) The Influence of Pore Characteristics on Rock Fragmentation Mechanism by High Voltage Electric Pulses. *Plasma Science and Technology*, **25**, Article ID: 055502.

- [13] 章志成, 裴彦良, 刘振, 等. 高压短脉冲作用下岩石击穿特性的实验研究[J]. 高电压技术, 2012, 38(7): 1719-1725.
- [14] 白丽丽. 等离子体钻井脉冲放电击穿破坏岩石机理研究[D]: [博士学位论文]. 大庆: 东北石油大学, 2023.
- [15] Wang, E., Shi, F. and Manlapig, E. (2012) Experimental and Numerical Studies of Selective Fragmentation of Mineral Ores in Electrical Comminution. *International Journal of Mineral Processing*, **112**, 30-36. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2012.07.005>
- [16] 刘伟吉, 张有建, 罗云旭, 等. 岩石内部高压电脉冲等离子体通道生成机理[J]. 石油学报, 2023, 44(4): 684-697.
- [17] Zhu, X., Luo, Y., Liu, W., Hu, H. and Chen, M. (2022) Numerical Electric Breakdown Model of Heterogeneous Granite for Electro-Pulse-Boring. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **154**, Article ID: 105128. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2022.105128>
- [18] 饶平平, 冯伟康, 崔纪飞, 等. 考虑多场耦合高压电脉冲作用下岩体破碎响应[J]. 工程科学与技术, 2024, 56(6): 93-102.
- [19] Zhu, X., Luo, Y., Liu, W., He, L., Gao, R. and Jia, Y. (2021) On the Mechanism of High-Voltage Pulsed Fragmentation from Electrical Breakdown Process. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, **54**, 4593-4616. <https://doi.org/10.1007/s00603-021-02537-5>
- [20] Kusaiynov, K., Nussupbekov, B.R., Shuyushbayeva, N.N., Tanasheva, N.K., Shaimerdenova, K.M. and Khassenov, A.K. (2017) On Electric-Pulse Well Drilling and Breaking of Solids. *Technical Physics*, **62**, 867-870. <https://doi.org/10.1134/s1063784217060184>
- [21] Yudin, A.S., Zhurkov, M.Y., Martemyanov, S.M., Datskevich, S.Y. and Vazhov, V.F. (2019) Electrical Discharge Drilling of Granite with Positive and Negative Polarity of Voltage Pulses. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **123**, Article ID: 104058. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2019.104058>
- [22] Li, C., Duan, L., Wu, L., Tan, S., Zheng, J. and Chikhotkin, V. (2021) Optimization of Discharge Circuit Model Based on Electro Pulse Boring Experiment. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, **86**, Article ID: 103730. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2020.103730>
- [23] Renshaw, C.E. (1997) Mechanical Controls on the Spatial Density of Opening-Mode Fracture Networks. *Geology*, **25**, 923-926. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1997\)025<0923:mcotsd>2.3.co;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1997)025<0923:mcotsd>2.3.co;2)