

磁场对电脉冲破岩过程中等离子通道影响研究

焦大维

上海理工大学环境与建筑学院, 上海

收稿日期: 2025年4月21日; 录用日期: 2025年5月14日; 发布日期: 2025年5月21日

摘要

高压电脉冲破岩技术是一种新型高效的破岩方法。文章利用COMSOL Multiphysics仿真软件构建了电-热-力-磁多物理场耦合的岩石电击穿数值模型。研究表明,磁场的存在对岩石内部等离子体通道的形成有一定影响,在改变通道形状的同时增大了岩石的损伤面积。在外部磁场的作用下,等离子体通道逐渐趋向于岩石内部发展。本研究可为高压电脉冲破岩技术的发展提供一定的理论依据,以及为电脉冲破岩设备的开发和参数优化提供参考。

关键词

电脉冲破岩, 多物理场耦合, 等离子体通道, 磁场

Study on the Influence of Magnetic Field on Plasma Channel in the Process of Rock Breaking by Electric Pulse

Dawei Jiao

School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Apr. 21st, 2025; accepted: May 14th, 2025; published: May 21st, 2025

Abstract

High-voltage electric pulse rock-breaking technology is a new and efficient rock-breaking method. In this paper, COMSOL Multiphysics simulation software is used to construct a numerical model of rock electrical breakdown coupling of electric-heat-force-magnetic multiple physical fields. The results show that the presence of a magnetic field has a certain influence on the formation of plasma channels in rocks, which changes the shape of channels and increases the damage area of rocks. Under the action of the external magnetic field, the plasma channel gradually tends to develop

inside the rock. The research in this paper can provide a certain theoretical basis for the development of high-voltage electric pulse rock-breaking technology and provide a reference for the development and parameter optimization of electric pulse rock-breaking equipment.

Keywords

Electric Pulse Rock Breaking, Multi-Physics Coupling, Plasma Channel, Magnetic Field

Copyright © 2025 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

在当今社会的能源消费结构中，化石燃料依然占据主导地位，其中石油与天然气的综合占比持续超过 60%，在现代工业体系的能源消耗中占据核心地位。根据 2017 年的统计数据，原油在全球一次能源消费中的平均比重达到 35.9%，而天然气的占比则为 27.1%。同年，全球一次能源消费总量同比增长 2.2%，这一增长主要归因于石油和天然气消费量的显著提升[1]。

油气资源勘探与开发过程中，钻井作业作为核心环节，其成本往往超过项目总投资的 50%，成为影响油气产业整体经济效益的关键因素[2]。为提高钻井效率并优化成本结构，近年来业界逐步将研究重点转向岩石破碎技术的创新与应用。随着电磁学、材料科学等学科的发展，电脉冲破岩技术逐渐崭露头角，该技术与传统机械破碎方法相比，具有能量密度高、作用时间短、井壁质量好、破岩过程可控性强的显著特征，是一种非常具有潜力的新型破岩方式[3]。电脉冲的破碎类型可分为液电破碎和电破碎两种形式[4][5]。电脉冲电压的上升时间不超过 500 ns，电脉冲作用形成的等离子体通道主要产生于岩石内部，此时破碎类型为电破碎；当电脉冲电压的上升时间超过 500 ns，等离子体通道会形成于液体介质内部，发生液电效应进而产生冲击波实现破岩功能。电破碎为直接破岩，破岩效率较高，且能耗比液电破碎低[6]-[8]。

Wiesmann 等[9]介绍了岩石介质阈值场强的概念，并提出了介电击穿模型。白丽丽[10]建立仿真模型分析高压电脉冲作用下岩石内部电场强度分布的特点。章志成[11]通过高压电脉冲破岩的实验，指出岩石产生电击穿的概率与岩石内部电场强度大小的关系。以往的研究中较少考虑外加磁场对电脉冲破岩过程的影响。本研究在电性参数随岩石内部电场强度变化的电击穿模型基础上，引入了外部磁场耦合机制，分析了外加磁场对等离子体通道生成与扩展行为的影响。利用 COMSOL 有限元数值模拟平台，构建了电-热-力-磁多物理场耦合的高压电脉冲破岩模型，对等离子体通道的形成规律进行研究，以揭示电脉冲破岩的多场耦合作用机制。

2. 高压电脉冲破岩机理

2.1. 等离子体通道形成过程分析

电脉冲破岩过程中，可依据物理机制和破坏特征划分为三个典型阶段。第一阶段为预击穿阶段，在此阶段中通过高压电极施加的脉冲电场促使岩石介质内部电荷发生定向迁移，局部电场强度梯度逐渐升高；这一过程为载流子的加速和碰撞电离提供了必要条件，同时为后续等离子体通道的形成积累能量。第二阶段为击穿阶段，当岩石介质局部电场强度超过介质临界击穿阈值时，电击穿现象在岩石内部发生，形成局部的等离子体区域；随着脉冲能量的持续注入，击穿区域逐步扩展形成了初步的等离子体通道；

这会导致岩石内部应力场的重新分布，并伴随微观裂缝的萌生。第三阶段为击穿完成阶段，此时电流沿已形成的等离子体通道集中，引起岩石介质局部温度急剧升高，同时生成高压冲击波。冲击波在岩石中传播并与介质相互作用，当应力场强度超过岩石的破坏阈值时，宏观断裂现象随之发生。这一阶段的能量转换效率直接影响破岩效果。

2.2. 电流场控制方程

高压电脉冲破岩过程中的时变电场状态可用麦克斯韦方程组描述：

$$\mathbf{E} = -\nabla\varphi \quad (1)$$

其中 $\mathbf{E}$ 为岩石内部电场强度， φ 为电势。

岩石内部电流密度场可分解为两个分量，可表示为：

$$\mathbf{J} = \mathbf{J}_c + \mathbf{J}_d \quad (2)$$

其中 $\mathbf{J}$ 、 $\mathbf{J}_c$ 和 $\mathbf{J}_d$ 分别为总电流密度、传导电流密度和位移电流密度。 $\mathbf{J}_c$ 和 $\mathbf{J}_d$ 分别表示为：

$$\mathbf{J}_c = \sigma_c \mathbf{E} \quad (3)$$

$$\mathbf{J}_d = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (4)$$

其中 σ_c 为材料的电导率， t 为时间变量， $\mathbf{D}$ 为电位移，可表示为：

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

其中 ε_0 和 ε_r 分别为真空状态下的介电常数和介质的相对介电常数。

岩石中电流密度矢量和电荷密度的关系如下：

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = \frac{\partial \rho_d}{\partial t} \quad (6)$$

其中 ρ_d 为介质内部电荷密度。

电势控制方程为：

$$\varepsilon_0 \varepsilon_r \nabla^2 \frac{\partial \varphi}{\partial t} + \sigma_c \nabla^2 \varphi = 0 \quad (7)$$

在高压电脉冲破岩过程中，岩石的电学特性呈现显著的动态演化特征，其电导率、相对介电常数等关键参数随电场强度的变化而发生改变。这种电学参数的动态变化会对岩石内部的电场强度变化和分布特性产生直接影响，进而调控等离子体通道的初始形成及后续扩展行为。研究表明，当外加电场强度超过临界击穿阈值时，岩石的导电特性发生本质转变，由初始的高阻态转变为低阻态。由 Zhu 等[12]研究可知，在高压脉冲电场作用下，岩石介质的电导率和相对介电常数呈现明显的增强效应，这一现象源于强电场作用下岩石内部载流子的雪崩倍增效应以及局部热电离过程。此外，介电常数的动态变化与电场强度变化密切相关。由于电学参数的动态演化直接影响能量耦合效率，在建立电脉冲破岩理论模型时，必须考虑其非电学性质变化对等离子体通道发展的影响作用。根据文献[13]的研究可得，在高压电脉冲作用下，岩石介质电导率变化规律可表示为：

$$\begin{cases} e_1, & \mathbf{E} < \mathbf{E}_{pc} \\ \frac{e_2 \cdot (\mathbf{E} - \mathbf{E}_{pc})}{\mathbf{E}_{ps} - \mathbf{E}_{pc}}, & \mathbf{E}_{pc} < \mathbf{E} < \mathbf{E}_{ps} \\ e_2, & \mathbf{E} > \mathbf{E}_{ps} \end{cases} \quad (8)$$

其中 E_{pc} 和 E_{ps} 分别为岩石介质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 分别表示岩石介质未发生电击穿的电导率和完全击穿后的电导率, 单位为 S/m 。在高压电脉冲作用下, 岩石介质的电学特性呈现明显的阈值响应特征。当内部电场强度低于初始击穿阈值时, 介质保持稳定的绝缘特性, 其电导率为 e_1 且维持恒定。随着电场强度超过临界击穿场强, 介质内部开始出现局部损伤, 这一过程伴随着载流子密度的非线性增长。当电场强度进一步达到完全击穿场强时, 介质发生本质性转变, 形成具有高导电性的等离子体通道, 此时击穿区域表现出类金属导电特性, 同时电导率增大到 e_2 , 岩石介质内部形成完整的等离子体通道。

根据 Zhu 等[14]的相关研究结果可得, 在岩石电击穿过程中介质相对介电常数随电场强度的变化规律可表示为:

$$\begin{cases} \varepsilon_{\max}, & E \geq E_{ps} \\ \frac{E - E_{pc}}{E_{ps} - E_{pc}} \times (\varepsilon_{\max} - \varepsilon_{\min}), & E_{pc} < E < E_{ps} \\ \varepsilon_{\min}, & E \leq E_{pc} \end{cases} \quad (9)$$

其中 $\varepsilon_{\min}$ 与 $\varepsilon_{\max}$ 分别为岩石介质在电击穿过程中相对介电常数的下限和上限。在高压电脉冲作用的过程中岩石介质内部电场强度增加, 但在未达到岩石的起始击穿场强时岩石不会发生电击穿, 该阶段对应的岩石介质的相对介电常数为 $\varepsilon_{\min}$; 随着电场强度增大到岩石的完全击穿场强, 该阶段对应的岩石介质的相对介电常数增大为 $\varepsilon_{\max}$ 。

2.3. 热效应方程

等离子体通道的初始形成阶段, 高压电脉冲能量的主要转化形式为将电能转化为等离子体生成所需的电离能。这一过程伴随着载流子的加速、碰撞电离以及雪崩倍增效应, 最终建立起稳定的等离子体通道。当通道形态趋于稳定且外加电压达到峰值时, 岩石内部电场强度亦随之达到极值, 此时电脉冲的作用机制发生显著转变。随着脉冲能量的持续注入, 其能量转化形式由通道形成过程的电离能主导过渡为等离子体通道内的焦耳热效应。电流通过高密度等离子体时产生的电阻耗散形成的电流热效应导致通道内部温度场发生变化。由于岩石材料的热膨胀系数较小, 应变对温度分布的影响在短时间内可忽略不计, 温度场的变化主要取决于等离子体的热输运特性。电流产生的焦耳热 Q 可描述为:

$$Q = |J_c| \cdot |E| = (\nabla V)^2 \sigma_c \quad (10)$$

热效应的控制方程可表示为:

$$c_p \rho \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla(\lambda \Delta T) = Q \quad (11)$$

其中 c_p 表示岩石介质的恒压热容量, 单位为 $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$; ρ 为岩石密度, 单位为 $kg \cdot m^{-3}$; T 为温度, 单位为 K ; λ 为热传导系数。联立式(10)和式(11), 可求得:

$$c_p \rho \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla(\lambda \Delta T) = (\nabla V)^2 \sigma_c \quad (12)$$

2.4. 力学场方程

在等离子体通道形成后, 高压电脉冲的能量会持续注入岩石内部, 促进等离子体通道扩张。通道因电流的热效应而膨胀, 在膨胀过程中对周围岩体做功。当所产生的应力超过岩石的抗拉强度时, 岩石就会发生破碎。等离子体通道的形成与扩张涉及热学场、机械场和电场之间的复杂相互作用。通常情况下,

电脉冲破岩的作用时间仅为几百纳秒。在纳秒级的时间尺度下，岩石内部应力波的传播速度远高于其塑性变形的发展速率，因此可将该过程中岩体的变形简化为弹性变形，且有以下关系成立：

$$\begin{cases} \varepsilon = \frac{1}{2}[(\nabla \mathbf{u})^T + \nabla \mathbf{u}] \\ \mathbf{C} = \mathbf{C}(\mathbf{E}, \nu) \\ \sigma = \mathbf{C} : \varepsilon \end{cases} \quad (13)$$

其中 $\mathbf{u}$ 表示岩石的位移场变量； σ 表示岩石的应力，单位为 Pa； $\mathbf{C}$ 为各向同性弹性矩阵； ε 表示岩石的应变，可以描述为：

$$\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_T \quad (14)$$

其中 ε_e 表示岩石有效应变， ε_T 表示岩石热应变。热应变 ε_T 可表示为：

$$\varepsilon_T = \alpha [T(t) - T_0] \quad (15)$$

其中 α 为岩石的热膨胀系数，单位为 K^{-1} ； $T(t)$ 描述等离子体通道的时变温度，单位为 K； T_0 为初始温度，单位为 K。

2.5. 等离子通道中粒子的磁场受力分析

在电磁场环境下，运动带电粒子所受到的洛伦兹力可由麦克斯韦方程组推导得出。在时变电磁场中，带电粒子的受力和运动方程可表示为：

$$\mathbf{F} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad (16)$$

$$\frac{d\mathbf{v}}{dt} = \frac{q}{m}(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad (17)$$

其中 m 表示带电粒子的质量，单位为 g； q 表示带电粒子的电荷量，单位为 C； $\mathbf{E}$ 是电场强度，单位为 V/m； $\mathbf{B}$ 是磁通量密度，单位为 Wb； $\mathbf{v}$ 是带电粒子的速度，单位为 m/s。

假设高压电极和接地电极之间的电场为均匀电场，则带电粒子速度可表示为：

$$v_x = \frac{\varphi_1}{|\mathbf{B}|l} \sin\left(\frac{q|\mathbf{B}|}{m}t\right) + v_x(0) \cos\left(\frac{q|\mathbf{B}|}{m}t\right) \quad (18)$$

$$v_y = \frac{\varphi_1}{|\mathbf{B}|l} \left(1 - \cos\left(\frac{q|\mathbf{B}|}{m}t\right)\right) + v_x(0) \sin\left(\frac{q|\mathbf{B}|}{m}t\right) + v_y(0) \quad (19)$$

其中 v_x 和 v_y 分别是带电粒子在 X 方向和 Y 方向上的速度； $v_x(0)$ 和 $v_y(0)$ 分别表示带电粒子在 X 方向和 Y 方向上的初始速度，单位为 m/s； φ_1 为电极电压，单位为 V； l 是两个电极之间的距离，单位为 m。可得带电粒子的路径方程为：

$$X = \frac{m\varphi}{q|\mathbf{B}|^2 l} \left(1 - \cos\left(\frac{q|\mathbf{B}|}{m}t\right)\right) + \frac{m}{q|\mathbf{B}|} v_x(0) \sin\left(\frac{q|\mathbf{B}|}{m}t\right) + X_0 \quad (20)$$

$$Y = -\frac{m\varphi}{q|\mathbf{B}|^2 l} \sin\left(\frac{q|\mathbf{B}|}{m}t\right) + \frac{m}{q|\mathbf{B}|} v_x(0) \left(1 - \cos\left(\frac{q|\mathbf{B}|}{m}t\right)\right) + \left(\frac{\varphi}{|\mathbf{B}|l} + v_y(0)\right) + Y_0 \quad (21)$$

其中： X 和 Y 分别表示带电粒子的轨迹， X_0 和 Y_0 分别表示带电粒子的初始横纵坐标位置。

2.6. 多物理场耦合关系

高压电脉冲作用下岩石内部等离子体通道的形成过程伴随着显著的多物理场耦合效应。电脉冲能量的作用促使通道快速萌生发展, 导致局部应力场的重新分布, 同时产生显著的焦耳热效应。热-力耦合作用显著改变了岩石介质的力学特性和电学特性, 进而影响后续岩石介质的破碎。等离子体通道的瞬态扩展会激发高强度冲击波, 其压力幅值可达数百兆帕量级。图 1 为表述该过程中多物理场耦合关系的示意图。其中, E_k 、 J_k 、 σ_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。等离子体通道形成后的能量转化过程主要体现为两种并行的物理机制: 首先, 能量以热能形式耗散, 导致通道内部温度急剧升高。这一热效应源于电流通过等离子体时产生的焦耳热, 其温度分布与电流密度和材料热导率密切相关。温度的升高不仅改变了岩石的局部热物理性质, 还通过热应力作用影响周围介质的力学行为。其次, 能量转化为等离子体通道的膨胀功, 表现为通道径向扩张对周围岩体施加的动态应力, 并受到岩石力学特性的制约。这种热-力耦合的能量转化机制影响岩石的破坏模式和效率。在等离子体通道内带电粒子的运动过程中, 由于带电粒子速度矢量与磁场方向并不重合, 粒子在运动过程中会受到洛伦兹力的作用而改变自身的运动路径。需要特别指出的是, 由于洛伦兹力与瞬时速度矢量的正交性, 其存在仅改变带电粒子的运动方向而不会对粒子做功, 因此并不直接参与与粒子能量的传递过程。

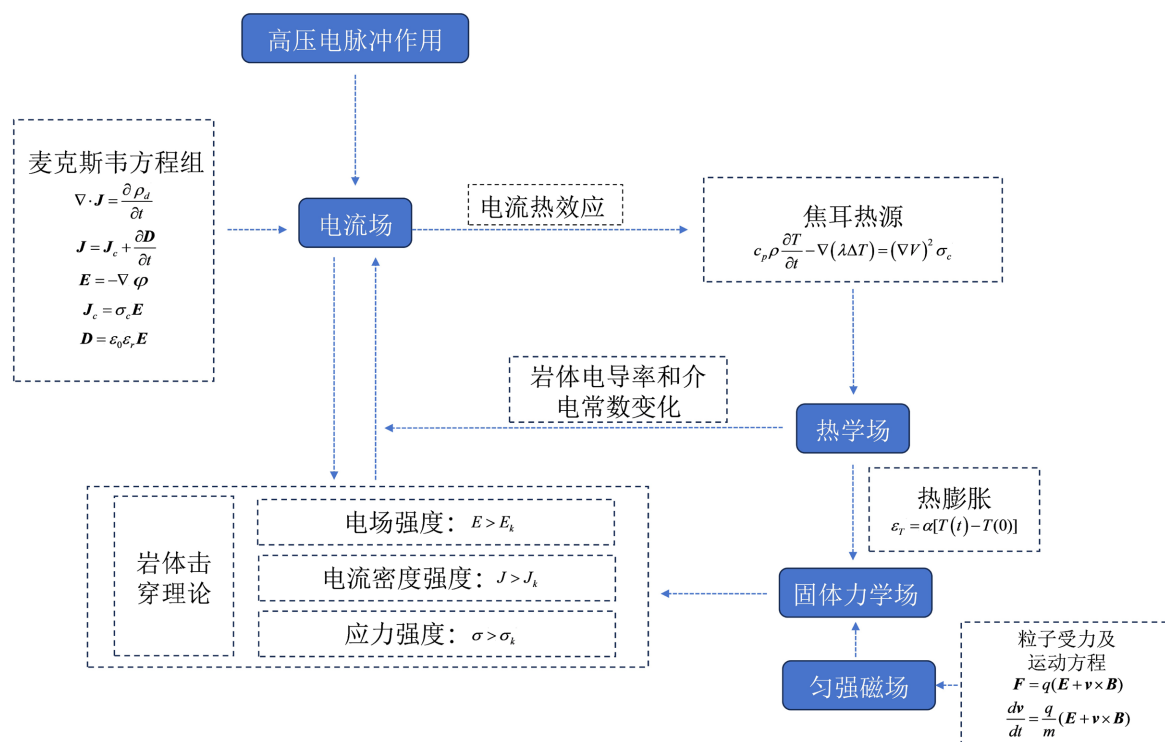


Figure 1. Electric-heat-force-magnetic coupling of multiple physical fields

图 1. 电-热-力-磁多物理场耦合关系

3. 数值模型构建

3.1. 二维仿真模型及参数设置

使用 COMSOL Multiphysics 建立二维电脉冲破岩数值模型, 模拟岩石在电-热-力-磁多物理场耦合条件下的电击穿过程。模型中高压电极和接地电极呈轴对称分布, 两电极与岩石表面接触。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，周围环绕绝缘套筒且绝缘介质的击穿场强应大于岩石的击穿场强，从而保证电脉冲能量作用于岩石内部，岩石两侧放置磁体用于产生磁场。如图 2 所示，电极间距 L 为 10 mm，岩石宽度 W 为 50 mm，厚度 H 为 30 mm。模拟的放电次数为 1，采用瞬态静电场模拟高压电脉冲破岩过程。电极与绝缘材料的各项参数如表 1 所示，岩体的基本参数如表 2 所示。

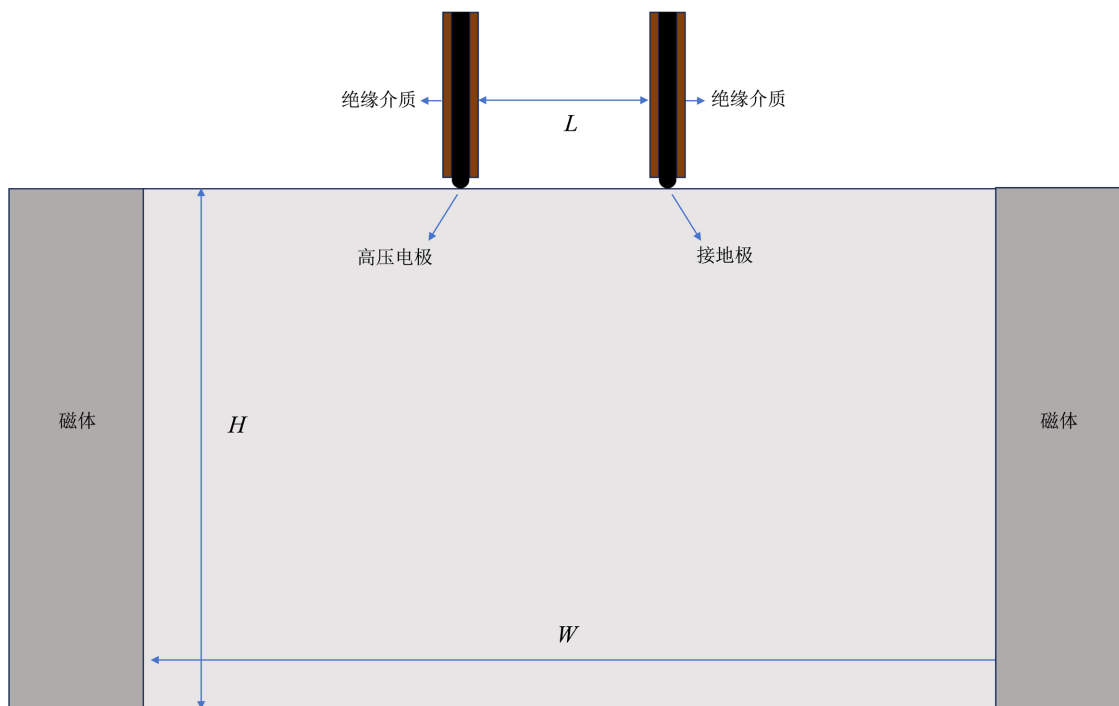


Figure 2. High-voltage electric pulse rock breaking model

图 2. 高压电脉冲破岩模型

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 ⁻¹ ·K ⁻¹)	导热系数/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)
电极	5.7×10^7	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^{-5} (S/m)	4.5
比热容/(J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	711
热膨胀系数/ 10^{-5} (K ⁻¹)	0.75
导热系数/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	2.34
密度/(kg·m ⁻³)	2630
弹性模量/(GPa)	53.0
泊松比	0.13
临界击穿场强/(kV/cm)	50

3.2. 模型验证

将本文模型的模拟结果与文献的实验与仿真结果进行对比分析。图 3(a)和图 3(b)分别为文献[15]在 0 T 大小磁场环境下等离子体通道形成路径和本文模型在 0 T 环境下的等离子体通道路径。经对比可得, 本文模型模拟结果与实验结果吻合度较好。图 4 为不同大小磁场环境下本文模拟结果中岩石损伤面积与文献[16]中结果的比对, 可验证模型的正确性。

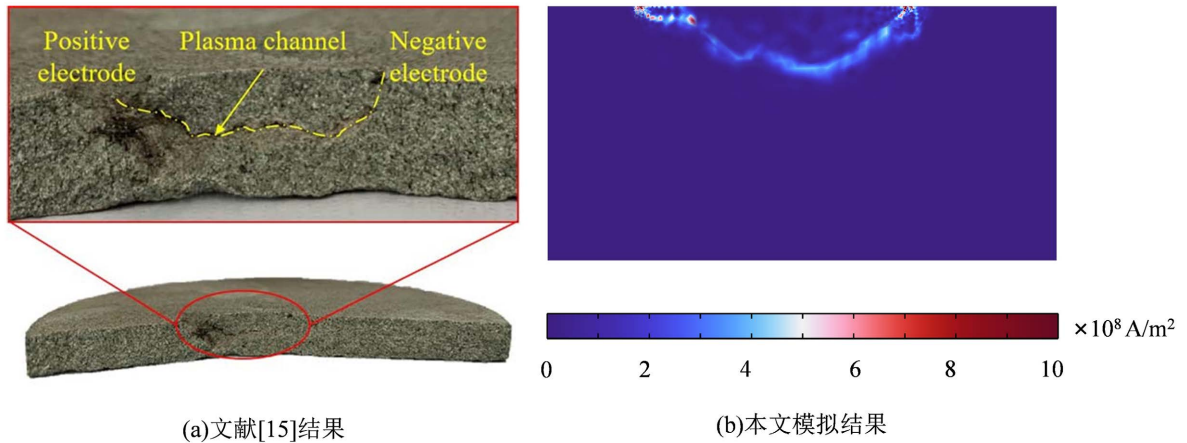


Figure 3. Plasma channel path comparison
图 3. 等离子体通道路径对比

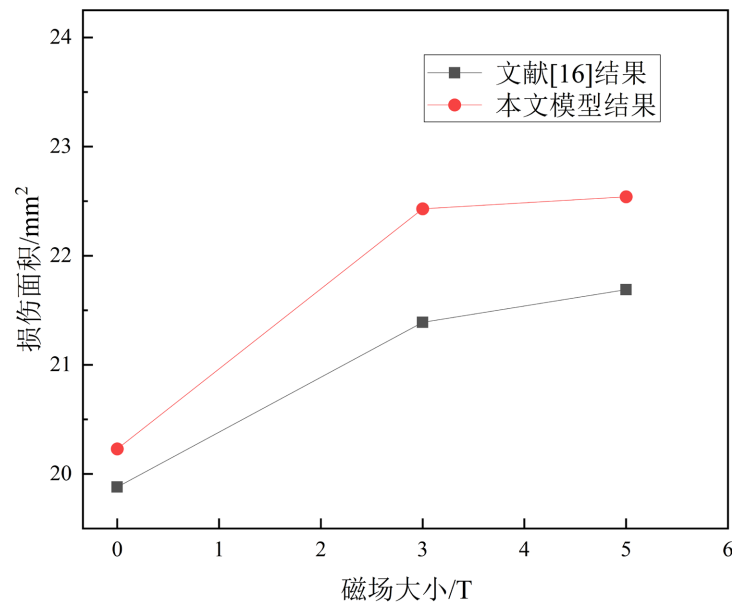


Figure 4. Comparison of rock damage area in different magnetic fields
图 4. 不同大小磁场环境岩石损伤面积对比

4. 结果分析

图 5 表示在脉冲电压上升时间为 200 ns、电压峰值为 31 kV、外加磁场大小为 5 T 的情况下, 岩石内部的等离子体通道发展过程。通过分析电 - 热 - 力 - 磁多场耦合条件下击穿通道的演化过程, 可以观察到在 140 ns 之前, 岩石内部电流密度模的变化较小, 只达到 10^3 A/m^2 量级, 此时等离子体通道尚未完全形成。这

一现象表明岩石内部大部分区域的局部电场强度未能达到其击穿场强的阈值,此时高压电脉冲的能量主要用于形成等离子体通道。在此阶段,电流密度模的分布呈现出显著的局部化特征,其变化主要集中在两电极附近的区域。随着时间推移,电极之间的电场强度逐渐增加,电场强度超过岩石介质的临界击穿场强时,初始等离子通道开始形成。当达到 140 ns 之后,岩石内部两电极之间的中间区域开始形成完整的等离子体通道,该区域岩石介质的电场强度超过了自身的临界击穿场强,从而引发了贯穿两电极的完整击穿路径的形成。140 ns 后,电脉冲的能量继续作用于岩石,此时等离子体通道内的电流密度模可达 10^{10} A/m² 以上。

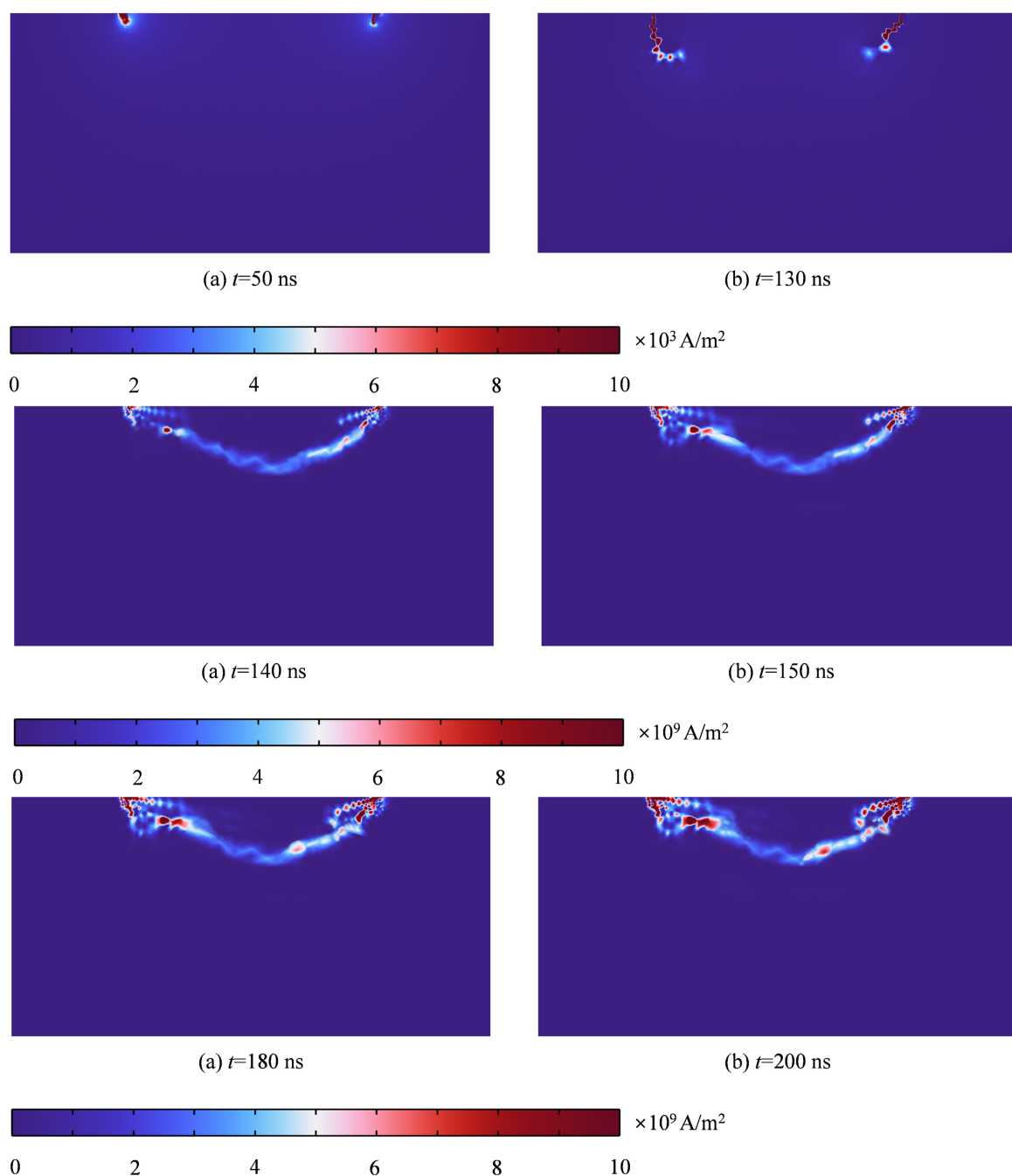


Figure 5. Formation process of plasma channel in 5 T magnetic field environment
图 5. 5 T 磁场环境下等离子通道形成过程

5. 磁场大小对电脉冲破岩的影响

本节针对外加磁场大小对击穿通道的影响进行分析。电脉冲的峰值电压为 40 kV，峰值电压上升时间为 200 ns。不同大小磁场对等离子体通道的发展影响如图 6 所示。随着磁场强度的增加，等离子体通道的位置越深入岩石的内部。当无磁场作用即 $B=0\text{ T}$ 时，产生的等离子体通道相较于 5 T 磁场作用条件下更接近于岩石表面。3 T 大小的磁场足以使等离子体通道产生明显分支，但对通道深度的影响并不明显；当磁场大小 B 进一步增大到 4 T 时，通道进一步向岩石内部扩展，且存在多条等离子体击穿通道。随着磁场进一步加大到 5 T，岩石内部只产生一条主要的等离子体通道。

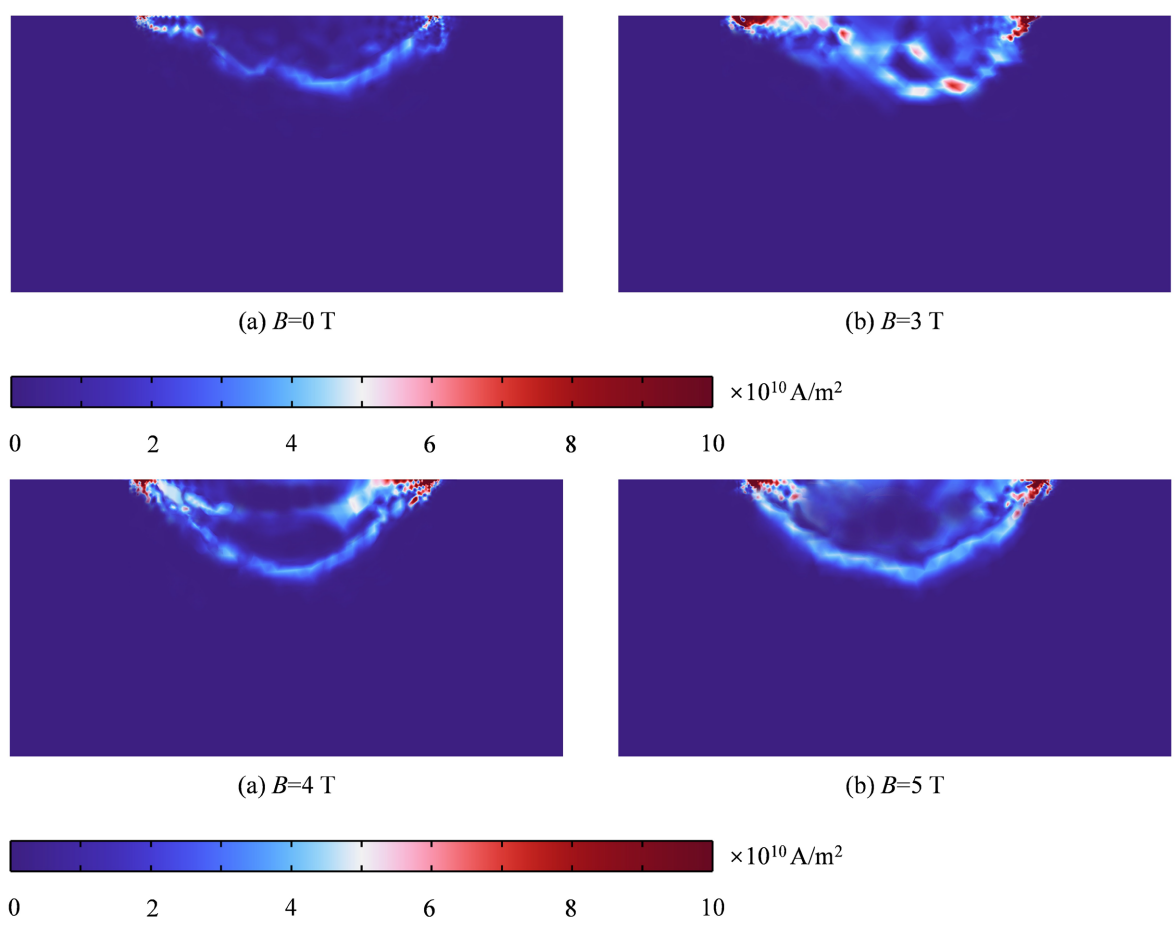


Figure 6. Influence of different magnetic fields on the formation of plasma channels

图 6. 不同大小磁场对等离子通道形成的影响

6. 结论

本文通过建立电 - 热 - 力 - 磁多场耦合的高压电脉冲破岩模型，分析在磁场环境下电脉冲作用过程中等离子体通道的形成规律，得到如下结论：

- 1) 外部磁场作用会使高压电脉冲破岩过程中形成的击穿通道形状发生改变。磁场越小，形成的击穿区域越接近于岩石表面。
- 2) 随着磁场逐渐增大，岩石的损伤区域也在增大，击穿通道会趋向于岩石深处发展。在工程应用中可适当增大磁场以提高破岩效率。

3) 在电脉冲峰值电压为 40 kV、电压上升时间为 200 ns 的条件下, 4 T 磁场环境中会有多条通道的分支, 而 5 T 磁场环境中只有一条主等离子体击穿通道。故在相同条件下适当提高磁场大小有利于使电脉冲能量集中于主等离子体通道从而破岩。

参考文献

- [1] 崔蕾. 地沟油生物柴油在工业炉窑中燃烧排放特性研究[D]: [硕士学位论文]. 昆明: 昆明理工大学, 2019.
- [2] 谢和平. 深部岩体力学与开采理论研究进展[J]. 煤炭学报, 2019, 44(5): 1283-1305.
- [3] 秦永红, 高鹏, 韩跃新, 等. 高压脉冲放电作用下破碎产物分形规律[J]. 金属矿山, 2019(2): 156-162.
- [4] 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>
- [5] 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 No. 250.
<https://doi.org/10.3390/en15010250>
- [6] Andres, U. (1995) Electrical Disintegration of Rock. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, **14**, 87-110.
<https://doi.org/10.1080/08827509508914118>
- [7] Fujita, T., Yoshimi, I., Shibayama, A., et al. (2001) Crushing and Liberation of Materials by Electrical Disintegration. *The European Journal of Mineral Processing and Environmental Protection*, **1**, 113-122.
- [8] Ito, M., Owada, S., Nishimura, T. and Ota, T. (2009) Experimental Study of Coal Liberation: Electrical Disintegration versus Roll-Crusher Comminution. *International Journal of Mineral Processing*, **92**, 7-14.
<https://doi.org/10.1016/j.minpro.2009.02.007>
- [9] Wiesmann, H.J. and Zeller, H.R. (1986) A Fractal Model of Dielectric Breakdown and Prebreakdown in Solid Dielectrics. *Journal of Applied Physics*, **60**, 1770-1773. <https://doi.org/10.1063/1.337219>
- [10] 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.
- [11] 章志成. 高压脉冲放电破碎岩石及钻井装备研制[D]: [博士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- [12] 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>
- [13] 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.
- [14] 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>
- [15] Liu, W., Zhang, Y., Zhu, X. and Luo, Y. (2023) The Influence of Pore Characteristics on Rock Fragmentation Mechanism by High-Voltage Electric Pulse. *Plasma Science and Technology*, **25**, Article ID: 055502.
<https://doi.org/10.1088/2058-6272/acab42>
- [16] Liu, W., Zhou, X. and Zhu, X. (2023) The Effect of Magnetic Field on the Electric Breakdown Trajectory of High-voltage Electric Pulse Rock Breaking. *Contributions to Plasma Physics*, **64**, e202300086.
<https://doi.org/10.1002/ctpp.202300086>