

基于COMSOL的高压放电破碎岩石仿真研究

马宁¹, 金博^{2,3}, 周鹏¹, 钱阳¹, 薛启龙^{*2,3}

(1.北京三一智造科技有限公司,北京100000; 2.中国地质大学(北京)工程技术学院,北京100083;
3.自然资源部深部地质钻探技术重点实验室,北京100083)

摘要:常规旋挖钻机在钻进硬岩地层钻孔桩时存在进尺困难,钻头磨损大等问题。高压脉冲放电岩石破碎技术作为一种新型非机械式岩石破碎技术,在硬岩钻进领域具有广阔的应用前景。本文在分析高压脉冲放电破碎岩石机理的基础上,运用COMSOL Multiphysics软件,建立电-热-力多物理场耦合模型,开展花岗岩和砂岩在电压、电极间距、电解质等条件下的破碎规律仿真研究。结果表明,随着电压的增大,岩石产生的破碎区域呈线性增大;电极间距的增大导致岩石破碎区域减小;液体介质的电导率大小对放电结果的影响不大;选用多电极对放电可有效增加岩石的破碎面积。研究结果可为高压放电破碎岩石技术提供参考。

关键词:高压放电;岩石破碎;硬岩钻进;旋挖钻进;等离子通道;破岩机理;COMSOL

中图分类号:P634.1 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2022)06-0062-09

Simulation study on high voltage discharge rock breaking based on COMSOL

MA Ning¹, JIN Bo^{2,3}, ZHOU Peng¹, QIAN Yang¹, XUE Qilong^{*2,3}

(1.Beijing SANY Intelligent Technology Co., Ltd., Beijing 100000, China;
2.School of Engineering and Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;
3.Key Laboratory of Deep GeoDrilling Technology, Ministry of Natural Resources, Beijing 100083, China)

Abstract: As a new non-mechanical rock breaking technology, high voltage pulse discharge rock crushing technology has a broad application prospect in hard rock drilling. In this paper, based on the analysis of the mechanism of rock crushing by high voltage pulse discharge, the COMSOL Multiphysics software is used to establish the electric-thermo-mechanical multi-physical field coupling model, and to carry out the simulation research on the breaking law of granite and sandstone under the action of voltage, electrode spacing, electrolyte and other conditions. The results show that the broken area of rock increases linearly with the increase of voltage. The increase in electrode spacing results in the decrease in the rock fragmentation area. The conductivity of liquid medium has little effect on discharge results. The broken area of rock can be increased effectively by using multi-electrode pair discharge. The results can provide reference for high voltage discharge rock crushing technology

Key words: high voltage discharge; rock breaking; hard rock drilling; rotary drilling; plasma channel; mechanism of rock fragmentation; COMSOL

0 引言

在旋挖钻机进入国内工程应用的30多年时间

里,旋挖钻机主要用于对土层、砂砾层、软岩层的钻进施工。随着国内基础建设规模不断扩大,产生了

收稿日期:2022-01-19; 修回日期:2022-05-30 DOI:10.12143/j.ztgc.2022.06.009

第一作者:马宁,男,汉族,1982年生,机械工程专业,主要从事岩石破碎理论和桩基础施工工法研究工作,江苏省昆山市开发区澄湖路318号,22235450@qq.com。

通信作者:薛启龙,男,汉族,1983年生,副教授,博士研究生导师,博士,从事井下控制工程及岩石电爆破的研究工作,北京市海淀区学院路29号,xql@cugb.edu.cn。

引用格式:马宁,金博,周鹏,等.基于COMSOL的高压放电破碎岩石仿真研究[J].钻探工程,2022,49(6):62-70.

MA Ning, JIN Bo, ZHOU Peng, et al. Simulation study on high voltage discharge rock breaking based on COMSOL[J]. Drilling Engineering, 2022, 49(6): 62-70.

越来越多的旋挖入岩要求。传统旋挖钻机难以应对花岗岩、致密砂岩等坚硬岩层,会出现转矩不足、进尺困难、设备消耗大等一系列问题^[1-2]。近年来出现了一些新型施工方法与硬岩破碎技术^[3-5],其中,高压放电破碎岩石技术是最近十几年内逐渐发展的一种新型的岩石破碎技术,该技术与传统的机械式碎岩技术不同,是应用高压电脉冲放电导致岩石或者液相介质发生电击穿,产生等离子通道,通道中的电能与热能释放产生能量足够大的冲击波而导致岩石破碎^[5-7]。该方法有着环保、对原岩扰动小、可定向、易操控、对硬岩破碎效果良好等优势,在硬岩地层钻进施工中具有较大应用前景。目前的高压放电破碎岩石技术需要大型地面设备如储能装置与整流变压装置,在深井地层的应用还需进一步研究,而旋挖钻进主要应用于桩基施工,有着孔径大、深度浅的特点,容易解决该技术由于地面设备的问题对施工造成的影响。

近十几年来,针对高压放电破碎岩石技术,国内外学者开展了许多相关研究。CHO等^[8-9]分析了岩石电击穿过程中的电压、电流变化,并对放电后岩石进行了X射线扫描,得到了岩石电击穿规律;王志强等^[10]通过对菱镁矿石的高压脉冲放电破碎实验得到了矿石区域冲击波压力范围和放电能量转化效率;孔二伟等^[11]通过COMSOL软件仿真模拟得到了不同矿物成分和孔隙率对岩石内部电场强度分布的影响;梁丽等^[12]研制了高压电脉冲破岩实验装置,实现了 $\varnothing 60$ mm口径下的钻进碎岩。

目前对于高压放电破碎岩石的机理认识仍不明确,阻碍了该技术的参数设计与优化,更阻碍了这项技术的工程应用。本文利用COMSOL Multiphysics软件对高压放电破碎岩石技术进行了仿真模拟研究,建立针-针电极结构仿真模型,通过改变放电电压、电极间距得到花岗岩与砂岩的破碎规律;在此基础上通过改变液体介质和电极分布探究破岩影响因素;并进行了高压放电破碎岩石的实验。最后通过上述仿真结果,为该技术的工程运用提供一些理论基础和参数优化选择。

1 高压放电破碎岩石机理

目前关于气体和固体介质中的放电理论比较成熟,由于水中高压脉冲放电破碎岩石是一个瞬时过程,且其中涉及到多种物理现象,目前还没有公认的数理模型来完整描述高压脉冲放电破岩过程^[5]。针

对液相高压脉冲放电破碎岩石的应用,近年来国内外学者研究表明^[13-16],高压脉冲从放电电极向岩石传输后,若电压上升沿小于500 ns,岩石先于水被击穿,岩石中就会产生极化现象,并在岩石内部产生连接电极的等离子通道,等离子通道形成后,高压电脉冲产生的能量释放到等离子通道中,产生瞬时大量热能,等离子通道受热膨胀,产生作用在岩石上的张力,使岩石发生破碎。整个破碎过程可分为4个阶段:第一阶段,高压电脉冲通过电极作用在岩石,由于水和岩石的介电常数相差较大,电场在岩石内部集中;第二阶段,岩石表面发生击穿,岩石内部通过放电电极形成多个分支放电先导;第三阶段,主放电先导发展到接地电极,形成贯通的等离子通道,高压电脉冲产生的能量迅速在等离子通道内部释放,能量对岩石做功;第四阶段,岩石内部等离子通道在极高热能影响下迅速膨胀,对通道周围岩石产生拉伸应力,当应力超过岩石的抗拉强度时,岩石发生破碎。在第二阶段之前,整个高压放电破碎岩石主要涉及到电破碎,而在第三阶段之后则涉及到电、热、力等多物理场耦合。祝效华等^[17]对整个岩石电击穿过程电压、电流和等离子通道生成规律进行了整合,得到如下公式:

$$\frac{dy_1}{dt} = y_2 \quad (1)$$

$$\frac{dy_2}{dt} = y_3 \quad (2)$$

$$\frac{dy_3}{dt} = -\frac{y_2}{CL} - \frac{y_3(R_z + R_{ch})}{L} + \frac{E_d h^*}{\tau_1 L} - \frac{y_2 \left[v(t) e^{H/Ky_4} - H_a L_{ch}(t) e^{H/Ky_4} / (Ky_4^2) \frac{dy_4}{dt} \right]}{\sigma_0 \pi r^2 L} \quad (3)$$

$$\frac{dy_4}{dt} = \left(\frac{2Ky_4^2 y_2 e^{H/Ky_4}}{8\sigma_0 \sigma_B \pi^2 r^3 Ky_4^5 + y_2^2 H_a e^{H/Ky_4}} \right) y_3 \quad (4)$$

式中: C ——储能电容,F; L ——回路电感,H; R_z ——回路电阻, Ω ; R_{ch} ——主等离子通道电阻, Ω ; E_d ——通道压降场强,V/m; h^* ——特征长度,表征每个时间步中等离子通道分支生长距离,其与网格尺寸和生长方向有关,m; τ_1 ——单位步长等离子通道生长时间,s; $v(t)$ ——分支生长速度,m/s; H_a ——熔融岩体的活化焓,J/mol; K ——气体普适常数,8.314 J·mol/K; $L_{ch}(t)$ —— t 时刻的主等离子通道长度,m; σ_0 ——前指因子,S/m; σ_B ——黑体辐射常数,

取 $5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ 。

2 高压放电破碎岩石仿真模拟

2.1 仿真模拟研究方法

高压放电破碎岩石的过程涉及多种物理场耦合,由于该过程是一个发生在岩石内部的瞬时过程,且放电过程中会产生强烈磁场和强烈光线,室内实验难以测量破碎过程中的各种物理信息。因此本文采用仿真模拟的方法来研究高压放电破碎岩石过程。

在本仿真模拟中,主要包含放电通道形成、能量传导和热-力耦合关系3个基本研究步骤。放电通道形成步骤主要采用电路模型与三维实体模型对接的方式实现;能量传导主要采用传热模型;通过热-力耦合作用下得到岩石破碎规律。综上,本次仿真模拟主要采用电-热-力三物理场耦合条件下进行。

在本文中的仿真模拟主要采用COMSOL Multiphysics中的4个模块:电路模块、AC/DC模块、传热模块、固体力学模块。在COMSOL Multiphysics软件中,电路模块为零维模型,通过组件节点相互连接实现假设的电路,无实体电路图,进行二维转化后的电路模块结构图如图1所示, R_{ch} 为外部三维岩样模型电阻,整个电路通过COMSOL电路模块中的“外部I vs. U”节点连接到三维模型中的电极端。其中电压源设置为脉冲源,电压上升时间为200 ns。根据相关研究表明^[17],考虑到能量转换效率,电容 C 采用较大的5 μF ,回路电感 L 选取较小的0.05 μH ,减小电阻有利于能量转换效率的提高,因此电阻 R_1 取1 Ω 。电路内部电流规律满足基尔霍夫定律^[17]:

$$\frac{di(t)}{dt} = \frac{U_0}{L} - \frac{q(t)}{CL} - \frac{(R_1 + R_{\text{ch}})i(t)}{L} - \frac{\varphi_d(t)}{L} \quad (5)$$

式中: U_0 ——电压源电压,V; C ——回路电容,F; L ——回路电感,H; R_1 ——回路电阻, Ω ; R_{ch} ——外部电阻, Ω ; i ——电流,A; φ_d ——回路电势,V。

在三维仿真模型中,其电流分布满足电流守恒,在COMSOL软件电流模块中,电流守恒表达式采用将电位移与电场相关联的介电模型,该模型由电荷守恒定律与麦克斯韦方程推导得出,其基本表达式如下:

$$\nabla \cdot J = Q_{\text{pv}} \quad (6)$$

$$J = \sigma E + \frac{\partial D}{\partial t} + J_e \quad (7)$$

$$E = -\nabla U_0 \quad (8)$$

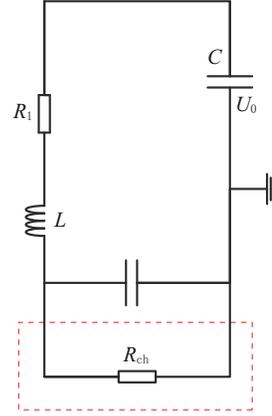


图1 电路模块结构

Fig.1 Circuit module structure

$$D = \epsilon_0 \epsilon_r E \quad (9)$$

式中: J ——电流密度, A/m^2 ; Q_{pv} ——电流源电流密度, A/m^2 ; D ——电位移, C/m^2 ; E ——电场强度, V/m ; σ ——电导率(由材料决定), S/m ; U_0 ——电压初始值(自变量),V; ϵ_0 ——绝对介电常数(真空),无量纲; ϵ_r ——相对介电常数(由材料决定),无量纲。

高压放电破碎岩石过程中,其内部电势分布关系为:

$$\nabla(-\epsilon_r \nabla \varphi_d) = \frac{\rho_i}{\epsilon_0} \quad (10)$$

式中: φ_d ——电场电势(正极放电端电势),V; ρ_i ——电荷密度, C/m^2 。

在等离子体通道形成后,电流中的能量作用于等离子通道,并对通道加热,使等离子通道受热膨胀。在仿真模拟中,把这一过程看做3个步骤,首先是高压电源的能量转化为热量,其次这部分热量传递到放电通道,最后放电通道在热能作用下产生热膨胀,使放电通道岩石发生破碎。这是一个电-热-力三物理场耦合过程,其中涉及到电磁热(焦耳热)、固体传热、热膨胀等耦合模块,数学关系如下^[18]:

(1)电磁热(焦耳热):

$$\rho_0 C_{p0} \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla q_0 = Q_e \quad (11)$$

$$q = -k \nabla T \quad (12)$$

$$Q_e = J \cdot E \quad (13)$$

式中: ρ_0 ——电极材料密度, kg/m^3 ; C_{p0} ——电极材料恒压下的比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; T ——绝对温度,K; q ——热通量, W/m^2 ; k ——导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; J ——电流密度; E ——电场强度, V/m 。

(2)固体传热:

$$\rho_1 C_{p1} \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla q_1 = Q_e + Q \quad (14)$$

式中: ρ_1 ——岩石密度, kg/m^3 ; C_{p0} ——岩石恒压下的比热容, $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$; Q ——岩石在环境中的温度, K 。

(3)热膨胀:

$$Q = Q_d = -T \frac{\partial(S:\alpha)}{\partial t} \quad (15)$$

$$\epsilon_{ch} = dL(T, T_0) \quad (16)$$

式中: S ——应力张量, Pa ; α ——热膨胀系数, $1/\text{K}$; ϵ_{ch} ——热应变, m 。

通过以上数学物理关系,不仅能够得到仿真模型的电流分布特点,还能对仿真模型在高压放电作用后的力学特性进行监测研究。

2.2 仿真模型建立

电路仿真模型概念图参照图1。仿真模型的建立如图2所示,图中blk1正方体为岩样,大小为 $0.5\text{ m} \times 0.5\text{ m} \times 0.5\text{ m}$,以岩样上表面中心对称设置两个电极,其中左侧cyl1为放电电极,右侧cyl2为接地电极,为简化模型减小计算量,将针电极简化为圆柱体,电极半径为 3 mm 。岩样上表面覆盖液体介质blk2,液体介质和电极高度为 0.1 m ,电极与岩样上表面接触,在接触面上设置复合表面,在岩样底部和电极上端施加固定约束,岩样四周为自由边界。网格划分采用自由四面体网格,划分网格后的模型如图3所示,研究求解方法为瞬态研究,时间步为 200 ns 。

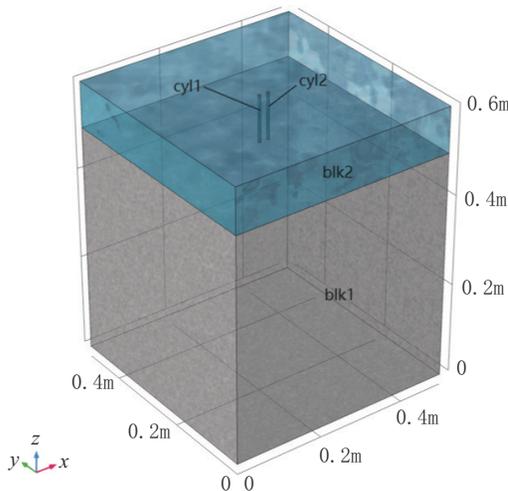


图2 数值模拟几何模型

Fig.2 Simulation geometrical model

电极材料采用COMSOL软件材料库中的铜,具体材料参数见表1。

岩样采用COMSOL软件材料库中的花岗岩和

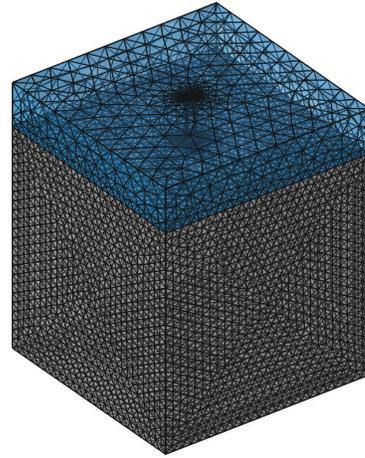


图3 网格划分

Fig.3 Mesh generation

表1 电极的材料参数

Table 1 Material parameters of the electrode

参数项	参数值
电导率/ $(\text{S}\cdot\text{m}^{-1})$	5.998×10^7
恒压热容/ $[\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}]$	385
导热系数/ $[\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{k})^{-1}]$	400
杨氏模量/GPa	126
泊松比	0.34
电阻率/ $(\Omega\cdot\text{m})$	1.667×10^{-8}

砂岩,具体材料参数见表2。

表2 岩样的材料参数

Table 2 Material parameters of rock

参数项	参数值	
	花岗岩	砂岩
杨氏模量/GPa	60	35
泊松比	0.25	0.2
相对介电常数	5	5
电导率/ $(\text{S}\cdot\text{m}^{-1})$	1×10^{-3}	1×10^{-3}
密度/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	2600	2500
恒压热容/ $[\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}]$	850	800
导热系数/ $[\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{k})^{-1}]$	2.9	1.7
热应变系数	6×10^{-6}	6×10^{-6}
抗拉强度/MPa	9	7.5
抗压强度/MPa	110	80

由于实际情况下的岩石组成较为复杂,结构组成、孔隙率等物理特性也会对高压放电破碎产生影响^[12]。进行仿真模拟研究时,为了更直观的观察岩石受到高

压放电作用后的破碎区域变化,将仿真岩样视为宏观上连续、均匀的介质,不考虑岩石的节理及孔隙。

3 仿真结果分析

3.1 破岩仿真过程分析

当基本参数设置完成后,开始进行仿真。初始电压 U_0 对回路储能电容 C 充电,储能电容中的能量经过回路流向放电电极,并通过放电电极端注入到岩石内部,此时等离子通道开始形成,并不断向岩石内部发展^[19]。若初始电压 U_0 足够高,则放电能量能够传至接地电极形成一条主要的放电通道,在等离子通道发展阶段,放电能量会通过电极与主放电通道呈树状向岩石内部随机发展,放电能量在此过程中不断向岩石内部传递能量^[7-9],导致岩石内部发生

热膨胀,产生应力并对周围岩石做功,当产生的应力超过岩石自身的强度时,岩石就会产生损伤^[17]。

3.2 放电电压对破岩效果的影响规律

高压放电破碎岩石过程中,初始电压大小对岩石的破碎起着至关重要的作用。在针对改变初始电压大小的模拟中,设定液体介质为蒸馏水,电极间距固定为 2 cm,电压上升时间为 200 ns,分别对初始电压值从 100 kV 至 300 kV^[13,18],每 25 kV 为一个间隔进行仿真模拟分析,共 9 组仿真模拟。不同电压放电后花岗岩的破碎区域分布云图如图 4 所示,砂岩破碎区域分布云图如图 5 所示,图中颜色图例表示岩石的损伤程度(%),颜色尺度从蓝色到红色表示岩石的破碎程度从小到大,无色区域为未受到高压放电作用影响区域。

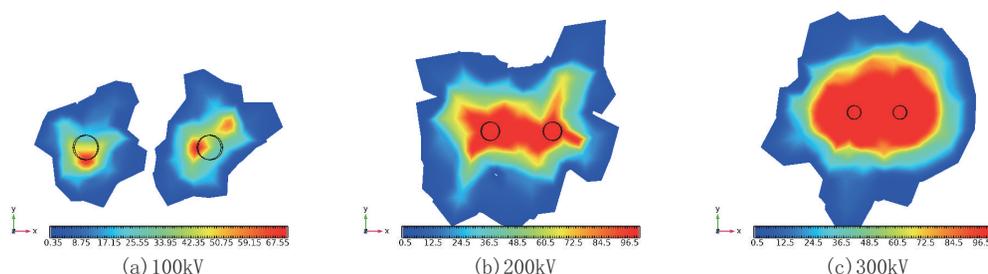


图4 不同初始电压下花岗岩破碎区域分布

Fig.4 Broken area distribution of granite at different initial voltage

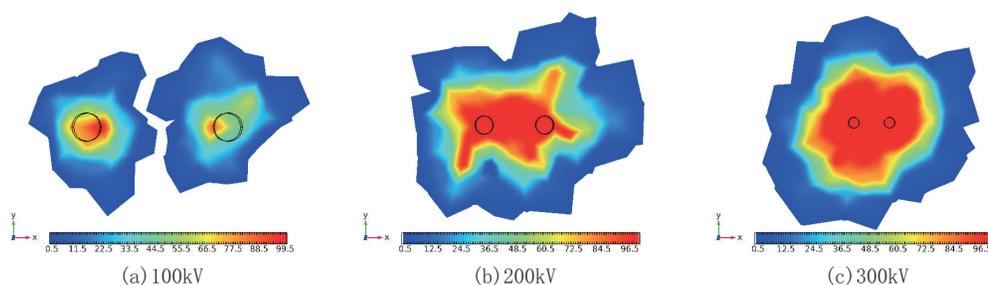


图5 不同初始电压下砂岩破碎区域分布

Fig.5 Broken area distribution of sandstone at different initial voltage

为了更加直观地对比相同电压下两种岩石的破碎区域,图 6 为不同初始电压放电后两种岩样的上表面破碎程度大于 60% 的面积。

对于 200 kV 以上电压,为了更加直观看出破碎区域范围,取岩样上表面中心,平行于 z 轴做与 x 轴和 y 轴垂直的两个切面,花岗岩和砂岩的破碎区域切面图如图 7 与图 8 所示。图 9 为两种岩石在 200~300 kV 电压下破碎程度大于 60% 的最深处深度。

通过高压放电破碎岩石电击穿机理可得,岩样

能否顺利被击穿,产生有效破碎,与作用在岩石内部的电场能量呈线性相关,随着初始电压的增大,岩石通过电极传导的能量不断增大,岩石击穿概率越大,破碎效率与破碎程度就会越高。通过仿真结果可知,在单次高压放电作用下,当电极间距恒定时,随着初始电压值增大,岩样破碎区域也不断增大。当电极间距为 2 cm,初始电压为 200 kV 以上时,花岗岩和砂岩两种岩样模型均能在电极间产生由于电击穿形成的破碎区域。而当电压值 < 200 kV 时,砂岩

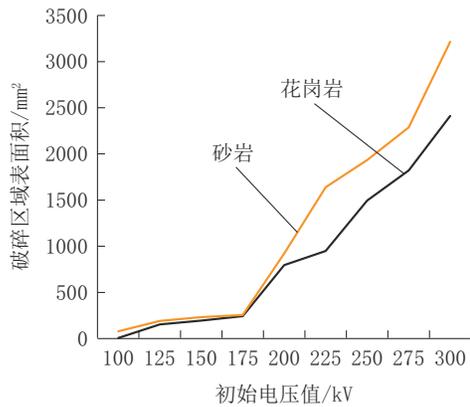


图6 初始电压对岩石表面破碎区域的影响
Fig.6 Influence of initial voltage on the surface broken area of rock

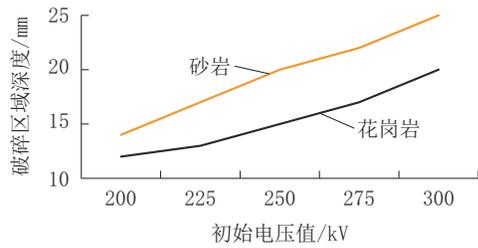
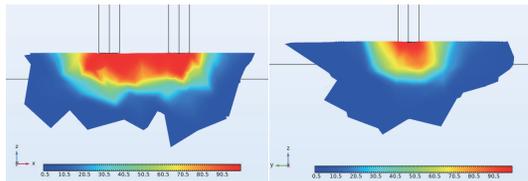


图9 破碎区域深度
Fig.9 Depth of broken area

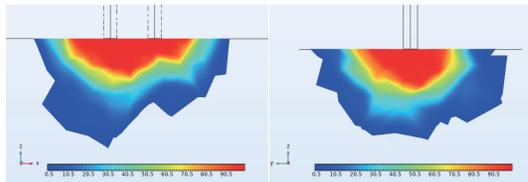
能够揭示放电通道的发展趋势,随着电压的不断增大,破碎区域呈现半球状—椭球状发展。通过图6和图9可直观看出,在相同的初始电压和电极间距下,由于砂岩的力学强度要小于花岗岩,砂岩模型放电后形成的破碎区域总是大于花岗岩模型。

3.3 电极间距对破岩效果的影响规律

高压放电破碎岩石过程中,电极间距也同样对破岩效果产生影响,为了得到不同电极间距下高压放电破碎岩石的效果,分别对不同间距下的放电电极进行仿真研究。本节的仿真模拟中,施加初始电压225 kV,分别选择2、3、4、5 cm间距的放电电极模型进行计算,在建立好的仿真模型中,电极间距为变量,其余参数与3.1节的仿真参数设置保持一致。由于在3.1节中已经对初始电压225 kV、电极间距2 cm进行了仿真,因此进行其余3种电极间距下的仿真计算,将计算结果进行分析比较。不同电极间距下的高压放电后岩石的破碎区域如图10与图11所示,图12为不同电极间距下两种岩石模型破碎程度大于60%的面积。

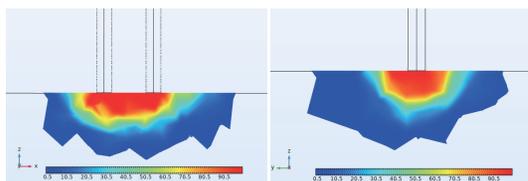


(a) 200kV

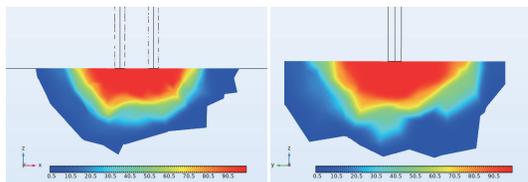


(b) 300kV

图7 花岗岩破碎区域切面
Fig.7 Section of granite broken area



(a) 200kV



(b) 300kV

图8 砂岩破碎区域切面
Fig.8 Section of sandstone broken area

和花岗岩岩样均仅能够在电极附近形成小范围点蚀损伤。深蓝色区域能够表明岩石放电后受影响的区域,由于能量耗散未能形成有效破碎,但一定程度上

随着电极间距的增加,从电极放电端到接地端的等离子通道距离也在同时增加,电场能量在通道中的耗散更大,不利于岩石的击穿破碎。通过仿真结果可知,固定初始放电电压,随着电极间距的增大,花岗岩和砂岩的主要破碎区域均在不断减小。从图10(c)可看出5 cm电极间距下花岗岩模型电极之间未能产生明显击穿破碎,破碎效果差,而砂岩模型在5 cm电极间距下仍然有较好的破碎效果(图11c)。随着电极间距增大,放电通道距离也在增加,放电能量未能使放电通道发生明显击穿,能量耗散到岩石内部中,仅在电极附近产生部分破碎,岩样未能形成完整破碎区域。若要使得岩石成功破碎,应采用较小电极间距或增加放电次数。

3.4 多组电极对破岩效果的影响规律

在实际应用下的高压放电碎岩装置中^[12,20],通

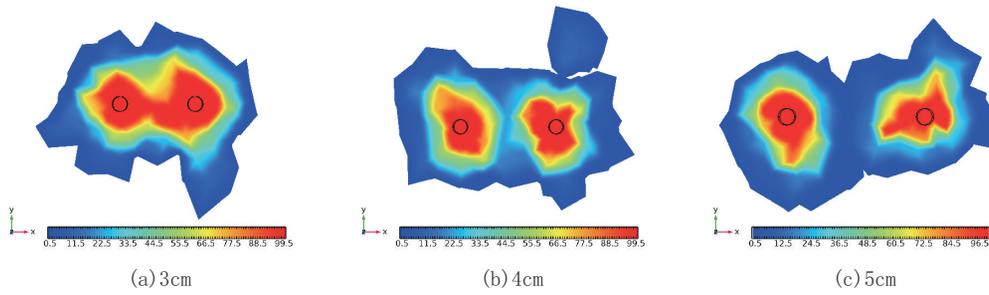


图 10 不同电极间距下花岗岩的破碎区域分布

Fig.10 Broken area distribution of granite at different electrode spacing

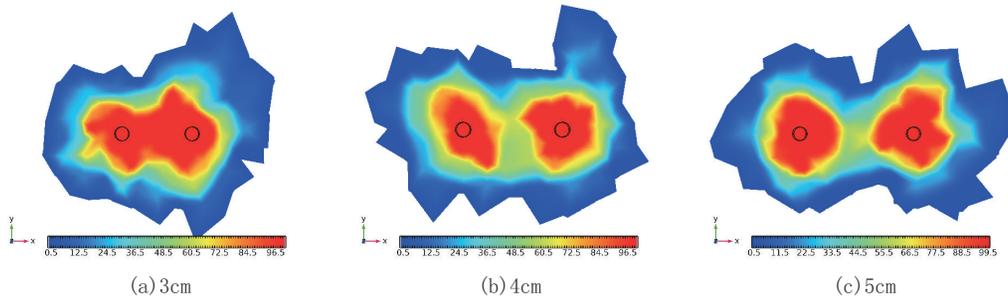


图 11 不同电极间距下砂岩的破碎区域分布

Fig.11 Broken area distribution of sandstone at different electrode spacing

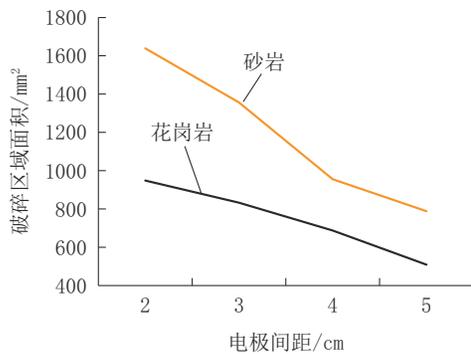


图 12 电极间距对岩石表面破碎区域的影响

Fig.12 Influence of electrode spacing on surface broken area of rock

常放电端由多组正负极端组成。因此在 3.1 节的仿真模拟基础上,研究多组电极对岩石破碎效果的影响。本节以花岗岩为例,设置 3 个电极与 5 个电极进行仿真模拟。位于中心的电极为放电电极,其余电极均为接地电极,放电电极与所有接地电极的距离均为 2 cm。为保证结果对照,消除其余参数带来的影响,该仿真模型除电极数量有所变化外,其余几何参数均参照第 2 章仿真模型设置。施加初始电压值为 200 kV,仿真模拟结果如图 13 所示。

通过与 3.1 节的仿真结果对比,若单个电极对下的放电参数能够对岩样实现有效破碎,增加接地

电极数量仍然能够实现对岩样的有效破碎,并且能够增大破碎区域表面积,但破碎深度会减小。花岗岩模型在 200 kV 电压,2 cm 电极间距下能够实现有效破碎,通过与图 11 对比,增加同等电极间距的电极后仍然能够实现有效的破碎,随着电极增加,有效破碎面积显著增大,但破碎深度相比于单个电极对略有降低,相比于 2 电极的 12 mm 深度,3 电极 10 mm,5 电极 9 mm。

4 高压放电破碎岩石实验

为了研究高压放电对岩石的影响,在仿真模拟的基础上,对花岗岩及砂岩进行了高电放电破碎实验。实验装置由直流电源、储能单元、放电开关和输出端组成(如图 14 所示)。实验采用双铜棒组成的针-针电极。将花岗岩和砂岩样品放入绝缘容器内,用自来水填充容器,将电极端部与岩石表面进行接触,在操作面板上设定初始电压、放电频率等参数后进行实验。

实验中设定初始电压值为 300 kV,电极间距 2 cm。在该条件下对两种岩石单次放电的破碎结果如图 15 所示。两种岩石在放电过程中,能够明显观察到水中放电现象,并伴随较大响声。砂岩放电破碎后产生粉末状岩屑,破碎区域比较直观可见;花岗岩放

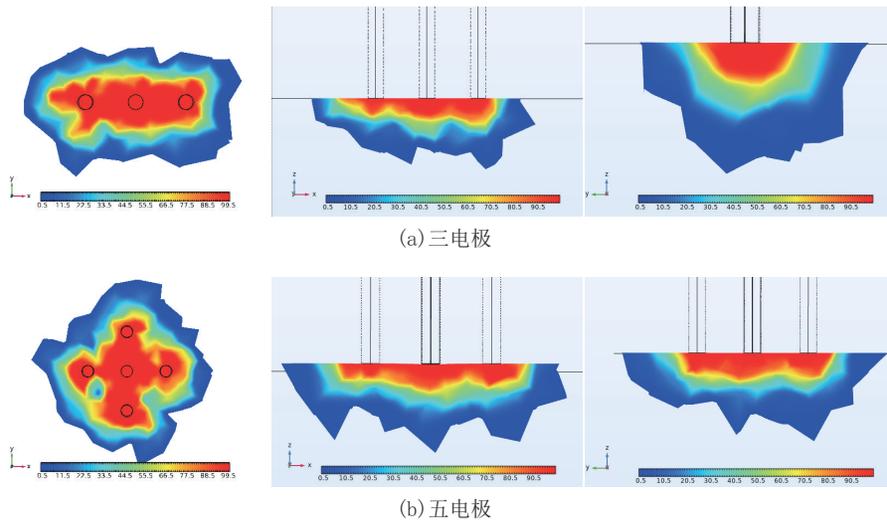


图13 多组电极下的花岗岩破碎区域

Fig.13 Granite Broken area with multiple electrodes



图14 高压放电破碎岩石实验装置

Fig.14 Experimental device for high voltage discharge rock breaking



图15 高压放电破碎岩石实验结果

Fig.15 Experimental results of high voltage discharge rock breaking

电破碎后产生点蚀凹坑和一些微小裂纹,破碎现象不明显,但放电电极和接地电极附近均存在凹坑。

5 结论与展望

(1)通过初始电压值的不断增加,模拟结果揭示了高压放电作用于岩石的区域及放电通道变化趋势。当处于室内实验和工程应用中,在不影响放电过程、实验设备寿命、保证操作安全可靠的情况下,应选择较大初始放电电压(>200 kV)以保证岩石的破碎。

(2)电极间距对高压放电破碎岩石有较大影响,若保证岩石的成功破碎,应采用较小电极间距或增加放电次数。虽然电极间距的缩小有助于岩石的

破碎,但随着电极靠近,在室内实验和工程应用中可能会导致电极间放电导致电极烧蚀损坏,对破碎岩石产生不利影响,在保证岩石能够形成有效破碎区域的情况下应避免选择较小的电极间距。

(3)在实际破岩装置设计中,在固定的电极钻头直径下,保证覆盖破碎区域的同时应尽量使用较少的接地电极,过多的接地电极数量会导致破岩装置作业深度减小,也提高了装置制造成本。

(4)通过对花岗岩和砂岩样品进行高压放电实验,验证了高压放电可对岩石产生破碎效果。

(5)本次数值模拟研究方法也存在一些局限和不足之处。在本文仿真模拟研究中,仅考虑了热能加载情况,实际高压脉冲放电破碎岩石过程中,还包

含了声能、光能、机械能等能量转化的情况;并且将岩石考虑为宏观上均匀、连续的介质,不含孔隙和节理。因此,后续需要对这一方法进行进一步改进,增加参数和算法对仿真模拟进行更加细致的研究,并进行更多的实验研究。

参考文献(References):

- [1] 周红军. 旋挖钻进技术适用性的初步研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2009, 36(8): 39-45.
ZHOU Hongjun. The study on applicability of rotary drilling technique [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2009, 36(8): 39-45.
- [2] 刘文忠, 管佩先, 孙宽良. 旋挖钻机入岩能力简述[J]. 建设机械技术与管理, 2010, 23(4): 69-72.
LIU Wenzhong, GUAN peixian, SUN kuanliang. Discussion on the drilling rock capacity of rotary drilling rig[J]. Construction Machinery Technology & Management, 2010, 23(4): 69-72.
- [3] 陈浩文, 殷国乐, 王艳丽, 等. 旋挖钻机用气动潜孔锤反循环硬岩钻进技术[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2018, 45(2): 68-72.
CHEN Haowen, YIN Guoyue, WANG Yanli, et al. Reverse-circulation hard rock drilling technology with pneumatic DTH hammer for rotary drilling rig [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2018, 45(2): 68-72.
- [4] 刘柏禄, 潘建忠, 谢世勇. 岩石破碎方法的研究现状及展望[J]. 中国钨业, 2011, 26(1): 15-19.
LIU Bailu, PAN Jianzhong, XIE Shiyong. On the research development of rock fragmentation and its prospect [J]. China Tungsten Industry, 2011, 26(1): 15-19.
- [5] 李昌平, 契霍特金.V.F, 段隆臣. 电脉冲破岩钻进技术研究进展[J]. 地质科技情报, 2018, 37(6): 298-304.
LI Changping, Chikhotkin Victor, DUAN Longchen. Research progress of electro pulse boring rock breaking technology[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2018, 37(6): 298-304.
- [6] Timoshkin I V, Mackersie J W, MacGregor S J. Plasma channel microhole drilling technology[C]//The 14th IEEE International Pulsed Power Conference. Texas, USA: 2003.
- [7] BOEV S, VAJOV V, JGUN D, et al. Electropulse technology of material destruction and boring[C]//Digest of Technical Papers. 11th IEEE International Pulse Power Conference. Baltimore, MA, USA: IEEE, 1997.
- [8] CHO S H, CHEONG S S, YOKATA M, et al. The dynamic fracture process in rocks under high-voltage pulse fragmentation[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2016, 49(10): 3841-3853.
- [9] CHO S H, YOKOTA M, ITO M, et al. Electrical disintegration and micro-focus X-ray CT observations of cement paste samples with dispersed mineral particles [J]. Minerals Engineering, 2014, 57: 79-85.
- [10] 王志强, 曹云霄, 邢政伟, 等. 高压脉冲放电破碎菱镁矿石的实验研究[J]. 电工技术学报, 2019, 34(4): 863-870.
WANG Zhiqiang, CAO Yunxiao, XING Zhengwei, et al. Experimental study on fragmentation of magnesite ores by pulsed high-voltage discharge [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(4): 863-870.
- [11] 孔二伟, 李傲, 曾石友, 等. 基于 Selfrag 脉冲等离子体放电破岩试验的仿真模拟[J]. 钻探工程, 2021, 48(8): 40-46.
KONG Erwei, LI Ao, ZENG Shiyong, et al. Simulation of rock breaking test by high voltage electric pulse discharge based on Selfrag [J]. Drilling Engineering, 2021, 48(8): 40-46.
- [12] 梁丽, 肖一标, 李大鹏, 等. 高压电脉冲破岩试验装置的研制[J]. 钻探工程, 2021, 48(11): 76-82.
LIANG Li, XIAO Yibiao, LI Dapeng, et al. Development of a high voltage electric pulse rock breaking experiment device [J]. Drilling Engineering, 2021, 48(11): 76-82.
- [13] Andres U, Timoshkin I, Soloviev M. Energy consumption and liberation of minerals in explosive electrical breakdown of ores [J]. Mineral Processing and Extractive Metallurgy, 2001, 110(3): 149-157
- [14] SUN Yaohong, FU Rongyao, FAN Ailong, et al. Study of rock fracturing generated by Pulsed Power Conference (PPC) [C]//Austin, TX, USA: IEEE, 2015: 1-4.
- [15] KRATEL A W H. Pulsed power discharges in water [D]. Pasadena, CA, American: California Institute of Technology, 1996.
- [16] Malakhov V.S., Kalyatskii I.I, Krivko V.V. The influence of several factors on pulsed electrical breakdown in rocks [J]. Journal of Mining Science, 1968, 4(5): 476-478.
- [17] 祝效华, 罗云旭, 刘伟吉, 等. 等离子体电脉冲钻井破岩机理的电击穿实验与数值模拟方法[J]. 石油学报, 2020, 41(9): 1146-1162.
ZHU Xiaohua, LUO Yunxu, LIU Weiji, et al. Electrical breakdown experiment and numerical simulation method of rock-breaking mechanism of plasma electric pulse drilling [J]. Acta Petrolei Sinica, 2020, 41(9): 1146-1162.
- [18] 徐国想. 复杂通道中的传热强化问题研究 [M]. 南京: 南京大学出版社, 2018.
XU Guoxiang. Study on Heat Transfer Enhancement in Complex Channels [M]. Nanjing: Nanjing University Press, 2018.
- [19] 许明进, 李宏达, 张岩. 高压电脉冲对绝缘液内矿石放电破岩仿真研究[J]. 科技创新与应用, 2020(17): 11-15.
XU Mingjin, LI Hongda, ZHANG Yan. Simulation study of high voltage pulse on ore breaking in insulating liquid [J]. Technology Innovation and Application, 2020(17): 11-15.
- [20] Changping Li, Longchen Duan, Laijie Wu, et al. Experimental and numerical analyses of electro-pulse rock-breaking drilling [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2020(77): 103263.