

基于 Selfrag 高压电脉冲放电破岩试验的仿真模拟

孔二伟^{1,2}, 李 傲³, 曾石友^{1,2}, 段隆臣³, 张 锋^{1,2}, 李昌平^{*4}

1. 河南省小口径钻探工程技术研究中心, 河南 郑州 450001;
2. 河南省地质矿产勘查开发局第四地质勘查院, 河南 郑州 450001;
3. 中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉 430074;
4. 中国地质大学(武汉)机械与电子信息学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 高压电脉冲破岩在高温等离子弧的作用下,产生的热应力超过岩石的强度极限时就会使岩石破碎,其破碎坚硬岩石有显著效果。为研究电压、岩石矿物成分、孔隙率3个参数对岩石内电场强度分布的影响,本文基于 Selfrag 高压电脉冲破岩的试验数据,利用 COMSOL Multiphysics 仿真软件建立了一种针电极结构仿真模型。结果表明,施加的电压不同,岩石内部电场强度分布不同;电场在不同矿物成分边界发生畸变,不同矿物成分相对介电常数变化越大,产生畸变越明显,高压电脉冲破碎优先发生在不同矿物成分的接触面;岩石内孔隙的存在,使其周围的电场发生了畸变,其他参数一定,孔隙率越大,岩石越容易被电击穿。研究结论可为高压电脉冲钻井破岩参数的选取提供参考。

关键词: 高压电脉冲破岩; 高压电脉冲钻井; Selfrag 试验; COMSOL 仿真模拟; 电场畸变

中图分类号: P634.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2021)08-0040-07

Simulation of rock breaking test by high voltage electric pulse discharge based on Selfrag

KONG Erwei^{1,2}, LI Ao³, ZENG Shiyu^{1,2}, DUAN Longchen³, ZHANG Feng^{1,2}, LI Changping^{*4}

1. Research Center of Slim-hole Drilling Engineering Technology in Henan Province, Zhengzhou Henan 450001, China;
2. The Fourth Geological Exploration Institute of Henan Geology & Mineral Bureau, Zhengzhou Henan 450001, China;
3. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan Hubei 430074, China;
4. School of Mechanical Engineering and Electronic Information, China University of Geosciences, Wuhan Hubei 430074, China)

Abstract: Under the action of high temperature plasma arc, high voltage electric pulse will produce thermal stress which can exceed the strength limit of rock, and break rocks, in particular hard rocks with obvious performance. This paper introduces the rock breaking mechanism of electric pulse. Based on the experimental data of Selfrag high-voltage electric pulse rock breaking, a simulation model of the needle electrode structure is established by using COMSOL Multiphysics simulation software. The influence of voltage, mineral composition and porosity on the distribution of electric field intensity in rock is studied. The results show that the distribution of electric field intensity is different with different applied voltage; the electric field distorts at the boundary of different mineral components, and the greater the change of relative permittivity of different mineral components, the more obvious the distortion is. Rock breaking with

收稿日期:2021-03-11; 修回日期:2021-07-26 DOI:10.12143/j.ztgc.2021.08.006

基金项目:河南省地质矿产勘查开发局项目“河南省小秦岭金矿田深部钻探关键技术研究”(编号:2018058028);国家自然科学基金项目“水介质中高压电脉冲破岩机理研究——以花岗岩为例”(编号:42002310)

作者简介:孔二伟,男,汉族,1987年生,工程师,勘查技术与工程专业,硕士,主要从事地质钻探和勘察工作,河南省郑州市高新技术开发区科学大道81号地质科技大厦,569224706@qq.com。

通信作者:李昌平,男,汉族,1990年生,工程师,控制科学与工程专业,博士,主要从事高压电脉冲钻头及地质装备研究工作,湖北省武汉市洪山区鲁磨路388号,lichangpingcug@126.com。

引用格式:孔二伟,李傲,曾石友,等.基于 Selfrag 高压电脉冲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 Shiyu, et al. Simulation of rock breaking test by high voltage electric pulse discharge based on Selfrag [J]. Drilling Engineering, 2021,48(8):40-46.

high voltage pulse occurs preferentially at the interface of different mineral components, and rock can be decomposed into various minerals depending on its composition. The presence of pores in the rock distorts the electric field around it; and the larger the porosity is, the easier electric breakdown the rock is. The research conclusion can provide reference for the selection of rock breaking parameters of drilling by high voltage electric pulse.

Key words: rock breaking by high voltage electric pulse; drilling by high voltage electric pulse; Selfrag test; COMSOL simulation; electric field distortion

脉冲功率技术是20世纪60年代开始发展起来的一个交叉学科的新兴技术。它是一种以较低的功率储存一定的能量,然后将能量以高功率密度的方式变换为脉冲能量的技术,它是应用物理学以及高压技术相融合的产物^[1-2]。脉冲功率技术的应用随着其蓬勃发展已渐渐从军事领域扩展到民用工业等领域,现已在医疗、环保、爆破等方面有着广泛应用^[3-6]。

国内外学者对高压电脉冲技术进行了广泛研究,在利用高压电脉冲破岩技术进行岩石开采^[7]、微矿石分解^[8-9]、水垢的清理及矿物的回收^[10-11]等方面已经取得了较大的进展,并逐步推广在高压电脉冲钻井^[12]技术中应用。Duan等^[10]实验结果表明,高压电脉冲可以达到较窄的金属浓度,这一特性有利于金属与环氧树脂分离,以达到矿物的筛选分离。Andres等^[13]通过高压电脉冲破岩试验,确定了优化能量消耗的3种方法:(1)提高脉冲功率发生器的效率;(2)优化电极几何结构;(3)优化电脉冲波形。Andres等^[14]利用电脉冲技术对磁铁矿和赤铁矿样品的比较解离试验表明效率很高,因为从电解离矿石中获得的铁精矿中SiO₂和P的杂质回收率大大降低。Wang等^[15]采用COULOMB 3D软件数值模拟了不同颗粒条件下岩石的电场强度,得到了矿物组成和电导率对岩石内部电场分布的影响。Razavian等^[16]针对磷矿进行仿真模拟,研究了矿物组成、颗粒大小、颗粒形状和电极距离对电场强度和分布的影响。

目前关于高压电脉冲破岩的影响因素已经有了大量的试验及仿真模拟研究,相比之下,两者相结合研究其影响因素的较少。本文基于Selfrag高压电脉冲破岩的试验参数,利用COMSOL Multiphysics仿真软件建立了一种针电极结构仿真模型,将电场强度作为表征指标,数值越高,说明越容易实现电击穿破碎。研究了电压、岩石矿物成分和孔隙率3个参数对岩石内电场强度分布的影响,从而可为高

压电脉冲钻井破岩参数的选取提供参考。

1 高压电脉冲破岩机理

由于高压电脉冲放电时的瞬时性、不可见性,目前还没有合适统一的物理数学模型来描述高压电脉冲破岩过程^[17]。Li等^[18]通过模拟结果表明,脉冲发生器产生的脉冲从电极向固体介质输入后,在固体介质表面产生极化现象,产生等离子通道;等离子体通道在不均匀的固体介质和液体介质的交界处形成,放电通道可以在ms级时间内积累能量密度,迅速提高温度,产生巨大压力;等离子体通道周围的电场强度明显高于其他区域;当等离子体通道的能量占总储能的20%~40%时,可以有效地击碎固体介质。国内外学者^[19-25]的研究表明,高压电脉冲破岩机可以分为4个阶段(图1):第Ⅰ阶段,电极上施加高压短脉冲,岩石内部首先产生电场;第Ⅱ阶段,岩石内部形成树枝状细小的放电先导,电极上电压及回路中电流下降较小;第Ⅲ阶段,当先导发展到对电极时,等离子体通道形成,迅速释放大量能量并对外做功,产生冲击波对岩石形成张拉破坏;第Ⅳ阶段,当应力超过岩石的强度时,岩石破碎并脱离主体。

2 Selfrag 高压电脉冲放电破岩试验

电场强度出现在介电常数和电导率差异很大的2种矿物相的边界上。表面导电矿物的存在扭曲了整个粒子的电场分布,改变了击穿路径和模式,进而影响了破裂结果。基于此,Selfrag高压脉冲选择性碎样仪利用冲击电压发生器激发的高功率电脉冲对固体物质进行放电,使固体破碎和分离。此破碎方法的优势在于,优先破裂面是不同物相的边界,其次是矿物的解理和裂理,最后才是随机的破裂。当物相之间的介电常数相差很大时,优势更明显。Selfrag高压脉冲选择性碎样仪在地球科学领域也有应用,可将云母、独居石、石英等矿石充分破碎,且根据矿物质不同,完全分解出不同成分的矿物质,为从混合矿物质中分选单矿物质提供了有效途径。

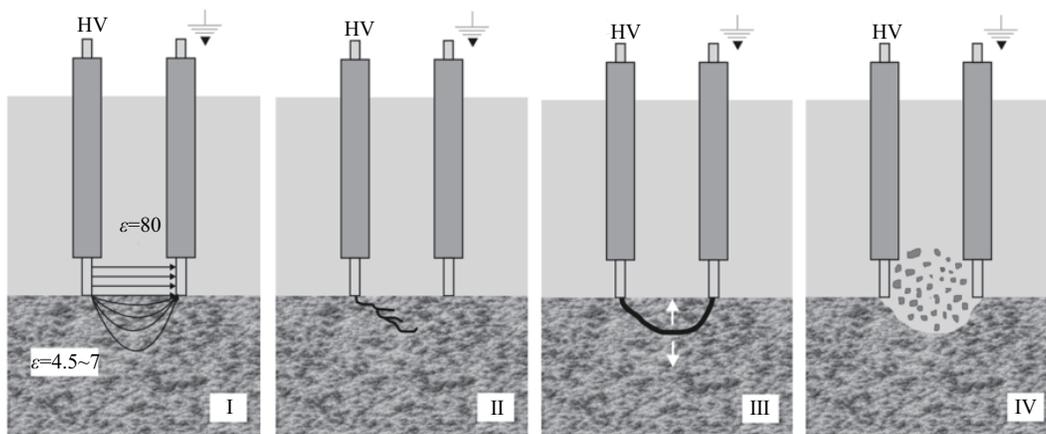


图1 高压电脉冲破岩机理

Fig.1 Rock breaking mechanism of high voltage electric pulse

脉冲放电发生器装备有电容和放电开关,可产生 200 kV 的高压脉冲和 22 kA 的脉冲电流。操作面板用于显示放电破岩过程中放电参数状态和控制放电破岩过程参数,可根据试验要求,设定脉冲工作电压(90~200 kV)、脉冲频率(1~5 Hz)、电极间距(10~40 mm)等工作参数。高压工作电极部分如图 2 所示,主要包括高压电极、低压电极、高压电极绝缘和接地,其中高、低压电极是 Selfrac 高压脉冲破碎仪的重要工作部件,其结构为针针电极形式。



图2 高压工作电极部分

Fig.2 High voltage working electrode

采用 Selfrac 进行放电碎岩试验,选择的破碎对象为花岗岩,绝缘介质为自来水,如图 3 所示为准备的花岗岩样品,高度不超过 40 mm,并将样品盛装容器中倒入自来水到一定高度,把样品盛装容器正确放置在升降台上,在操作面板上设定放电电压、电极



图3 花岗岩样品

Fig.3 Granite samples

间距、脉冲频率和放电次数。

Selfrac 高压电脉冲破碎岩试验过程中设定电压峰值 130 kV(监测峰值 124 kV),脉冲频率 5 Hz,电极间距 15 mm,总放电能量 689 J。图 4 所示为电脉冲破碎后的粗颗粒的花岗岩,图 5 所示为电脉冲破碎后的细颗粒的花岗岩。岩石薄片鉴定结果,岩石中各类矿物成分含量:钾长石 38%,斜长石 25%,石英 25%,黑云母(绿泥石)8%。得出 Selfrac 高压电脉冲破碎仪在该参数下能实现花岗岩的快速破碎。

3 高压电脉冲放电破岩仿真模拟

高压电脉冲破碎岩石是在多物理场耦合的环境下进行的,在破岩过程中,由于岩石内部成分的复杂性,岩石内部孔隙的影响,故采用多物理场仿真软件 COMSOL Multiphysics 进行仿真分析。根据放电松弛理论,岩石的放电松弛时间远大于外部放电时间,岩石可以被看作是一个绝热材料,可采用 COMSOL 中的 AC/DC 模块中的静电接口对高压电脉冲破岩过程进行数值仿真,岩石空间电场强度分布满



图4 破碎后的花岗岩粗颗粒
Fig.4 Coarse grains of broken granite

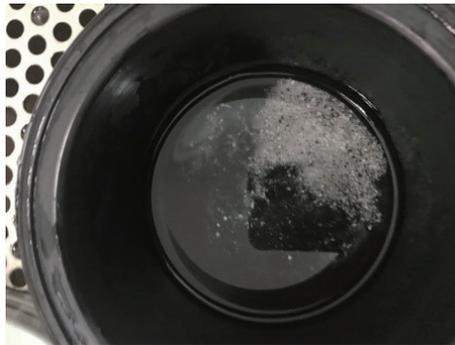


图5 破碎的细微矿渣
Fig.5 Broken fine slag

岩石矿物成分和孔隙率3个影响因素做单一变量影响因素研究。

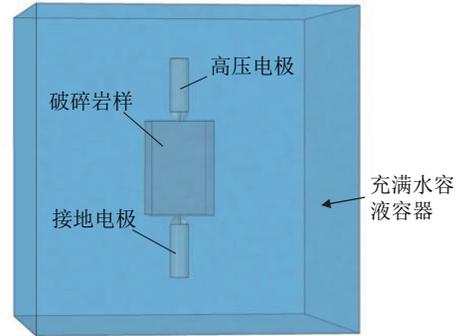


图6 建立仿真模拟几何模型
Fig.6 Simulation geometrical model

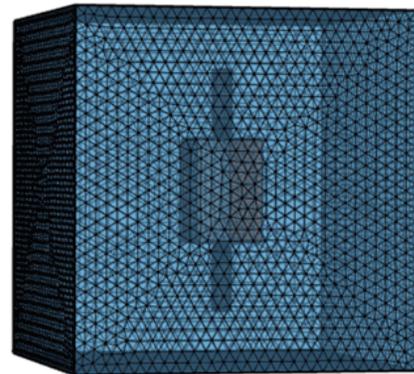


图7 四面体网格
Fig.7 Tetrahedral mesh

足静电场的高斯定理。其方程微分形式可用下式表示:

$$\begin{cases} E = -\nabla V \\ \nabla D = \rho_v \end{cases} \quad (1)$$

式中: E ——电场强度, kV/mm ; V ——电压, kV ; D ——真空中电场强度, kV/mm , ρ_v ——空间中电场密度, J/mm^3 。

基于Selfrag高压电脉冲放电破岩的试验数据,模拟中电压参数范围为90~200 kV;电极结构采用针针电极,正负电极尺寸为 $\varnothing 3\text{ mm}$ 圆柱,间距为15 mm,电极材料选取不锈钢,在一端电极上施加脉冲电压,另一端电极进行接地处理;液体介质为水,相对介电常数为81;岩石为花岗岩,岩石厚度为15 mm,相对介电常数为6.5,孔隙率为0.8%。建立模型如图6所示。通过在已定义模型的网格实体中使用自由四面体选项,在几何模型上拟合合适的网格,图7为已划分的四面体网格。模拟中分别对电压、

使用COMSOL求解器的默认选项,运行仿真并计算结果。

4 仿真模拟结果与分析

4.1 施加不同电压的影响

在高压电脉冲破碎岩石过程中,脉冲电压大小对岩石的破碎起到关键作用。在模拟中,岩石材料定义为花岗岩,液体介质为水,分别对脉冲电压为90、130、200 kV进行模拟分析。图8为施加不同电压时花岗岩内部电场强度分布。箭头的颜色、大小表示电场强度和方向。磁通总是沿高电势向低电势方向流动。通量的大小呈现在红色(高强度)到蓝色(低强度)的颜色尺度上。通量之间的距离代表电荷浓度,距离越短,电荷浓度越高。

从固体介质的电击穿理论可知,固体的电击穿与电压作用下固体内部的电场强度大小和分布有着

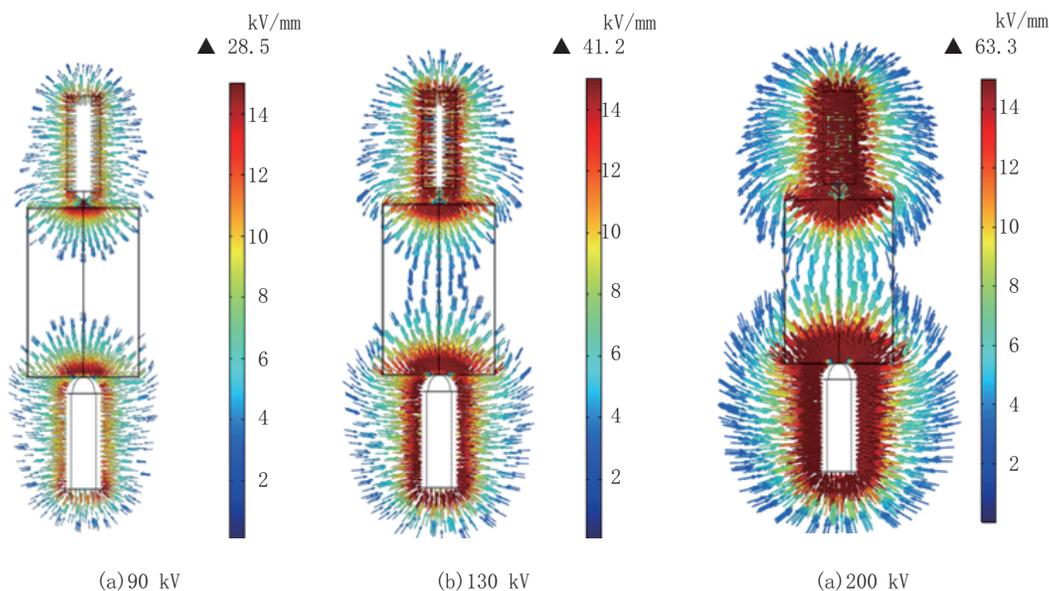


图8 不同脉冲电压下花岗岩内部电场密度分布

Fig.8 Distribution of electric field density in granite at different voltages

密切相关的关系,且固体内部电场强度的大小与电压作用于固体内部电场能量密切相关。随着施加电压的增大,岩石内最大电场强度增大,岩石内磁通量密度增大,电击穿概率越大,破碎效率也就越高。当施加 130 kV 电压参数时,完全形成等离子通道,在水溶液中,可以对 15 mm 厚度花岗岩进行有效破碎。

4.2 不同岩石矿物成分的影响

为了研究不同岩石矿物成分对高压电脉冲破岩的影响,仿真模拟时施加电压 130 kV,液体介质为水,定义了 3 种不同矿物成分(如图 9 所示):(a) 100% 长石,相对介电常数为 6.5;(b) 100% 磁铁矿,

相对介电常数为 65;(c) 上半部分 50% 为长石,下半部分 50% 为磁铁矿。(b) 与 (a) 相比,磁铁矿的相对介电常数较大,内部的最大电场强度 24.4 kV/mm,比长石内部最大电场强度 21.3 kV/mm 要大 3.1 kV/mm,但是其内部平均电场强度比长石内部要小。(c) 中可以发现电场强度在长石与磁铁矿边界发生明显的畸变,并且电场能量密度明显相较其它区域密,说明高压电脉冲破碎优先发生在不同矿物成分的接触面,根据岩石内矿物质不同,可以分解出不同成分的矿物质,为筛选不同矿物质提供了有效途径,这也是高压电脉冲破碎不同于机械破碎的一个显著特征。

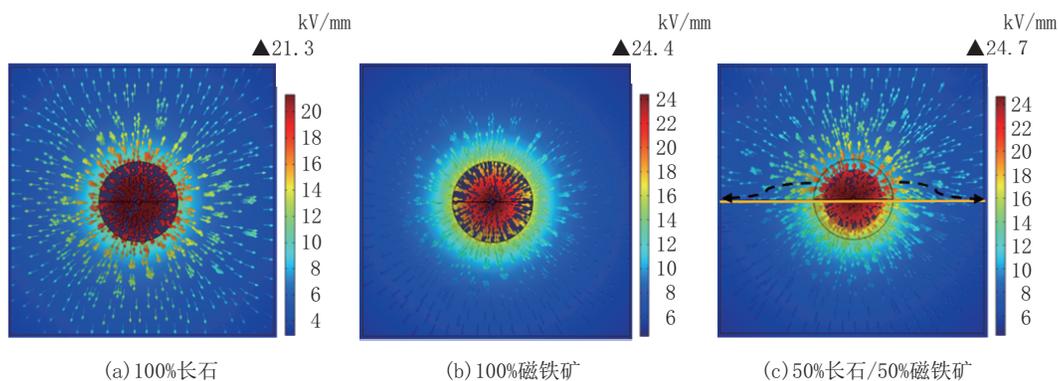


图9 矿物成分对电场强度分布的影响

Fig.9 Effect of different mineral composition on electric field intensity distribution

4.3 不同孔隙率的影响

为研究岩石内孔隙对高压电脉冲破岩的影响,本模型将岩石内孔隙放大,设定为 $\varnothing 1$ mm的球体,岩石为 $10\text{ mm}\times 10\text{ mm}\times 10\text{ mm}$ 正方体。模型内球体为空气材料,岩石材料为长石,相对介电常数为6.5,施加电压参数为130 kV。图10为单一孔隙在岩石内部电场强度分布云图,可以发现在岩石内远离孔隙的地方几乎不受孔隙影响,电场强度为13 kV/mm,接近孔隙处最大电场强度为18.2 kV/mm,是未加孔隙时的1.4倍。孔隙周围明显存在高低差,使周围电场强度产生了畸变,变得极不均匀,导致岩石内电场强度分布不均匀,根据固体的电击穿特点,在这样的电场强度分布中,其他相同的参数影响下,岩石相较于其他均匀固体介质更容易被电击穿。

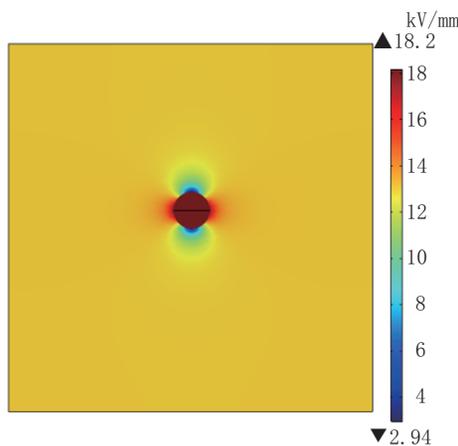


图10 单一孔隙影响下岩石内电场强度分布云图

Fig.10 Distribution of electric field intensity in rock under the influence of a single pore

图11为孔隙个数为0、1、6、10、15、20、25时对岩石内部电场强度的影响,可以发现孔隙个数从0变为1时,电场强度从13 kV/mm突变为18.2 kV/mm,说明岩石内有无孔隙对电场强度影响极大。随着孔隙个数的增加,岩石内部最大电场强度在孔隙为15时达到最大为20.8 kV/mm,随后趋于稳定。说明孔隙对电场强度的分布有较大影响,随着孔隙的增多,最大电场强度增大,但不是呈线性关系,而是达到一个值后趋于稳定。实际由于岩石内部矿物颗粒的联结方式,使得岩石内部存在大量孔隙,孔隙周围的电场畸变使得岩石内部电场强度在整体上也变得极不均匀,在相同的能量注入下,孔隙率高的岩

石可以更加有效形成电击穿,破岩效率越高。

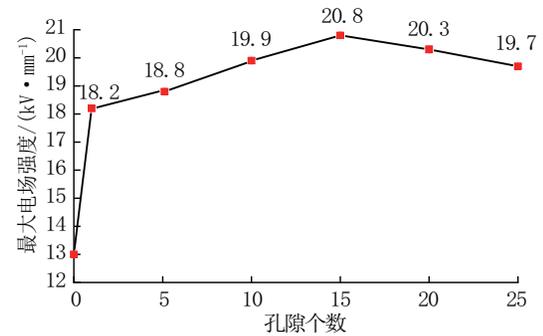


图11 孔隙个数对岩石内部电场强度的影响

Fig.11 Influence of the number of pores on the electric field strength in rock

5 结论与展望

(1)施加不同电压参数,岩石内部电场强度分布不同,随着施加电压的增大,岩石内部最大电场强度增大。当加载130 kV电压时,在水溶液中,可有效对15 mm厚花岗岩进行破碎。

(2)电场在不同矿物成分边界发生畸变,不同矿物成分相对介电常数变化越大,产生畸变越明显。高压电脉冲破碎优先发生在不同矿物成分的接触面,根据岩石内矿物质不同,可以分解出不同成分的矿物质。

(3)岩石的孔隙率对高压电脉冲破岩有较大影响,岩石内孔隙的存在,使其周围的电场发生了畸变,其他参数不变,孔隙率越大,岩石内最大电场强度增大,随着孔隙率的增大而趋于一个稳定值。

(4)目前设计的电脉冲钻机或原理性样机采用的高压脉冲电源设置在地面,深井及超深井电脉冲破岩钻进中电能传输过程中损失严重,需采用井下动力发电并将利用半导体技术,将脉冲功率电源和供电电源设计安装在井下,可减小能量传输过程中的损失。

(5)在大断面硬岩隧道掘进方面,传统的钻爆法开挖及全断面硬岩掘进(TBM)存在成本高、对地质条件要求较为严格等缺陷。因此在深井、超深井钻进及隧道快速开挖掘进施工方面需要研发新型破岩钻进技术,高压电脉冲钻进是具有潜力、接近工业化应用的一种新型破岩钻进方法。

参考文献(References):

- [1] 刘锡三. 高脉冲功率技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.
LIU Xisan. High Pulsed Power Technology[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2005.
- [2] 曾正中. 实用脉冲功率技术引论[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 2003.
ZENG Zhengzhong. Introduction to Practical Pulse Power Technology[M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 2003.
- [3] 江伟华. 脉冲功率系统的原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008.
JIANG Weihua. Pulsed Power Systems Principles and Applications[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2008.
- [4] Bluhm H, Frey W, Giese H, et al. Application of pulsed HV discharges to material fragmentation and recycling [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2000, 7(5):625-636.
- [5] Bluhm H. Pulsed Power Systems[M]. Berlin Germany: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006.
- [6] 马瑞, 周世生, 胡燕川, 等. 水中丝爆等离子体破岩机理研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2019, 46(11):1-7.
MA Rui, ZHOU Shisheng, HU Yanchuan, et al. Rock breaking mechanism of underwater wire explosion plasma[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019, 46(11): 1-7.
- [7] Yan F Z, Lin B Q, Zhu C J, et al. Using high-voltage electrical pulses to crush coal in an air environment: An experimental study [J]. Powder Technology, 2016, 298:50-56.
- [8] Andres U, Timoshkin I, Jirestig J, et al. Liberation of valuable inclusions in ores and slags by electrical pulses[J]. Powder Technology, 2001, 114(1/3):40-50.
- [9] Shi F, Zuo W, Manlapig E. Pre-concentration of copper ores by high voltage pulses. Part 1: Principle and major findings [J]. Minerals Engineering, 2015, 79:306-314.
- [10] Duan L C, Diao Z J, Zhao Y M, et al. Liberation of valuable materials in waste printed circuit boards by high-voltage electrical pulses[J]. Minerals Engineering, 2015, 70:170-177.
- [11] Touze S, Bru K, Menard Y, et al. Electrical fragmentation applied to the recycling of concrete waste—Effect on aggregate liberation [J]. International Journal of Mineral Processing, 2017, 158:68-75.
- [12] Timoshkin I V, Mackersie J W, Macgregor S J. Plasma channel miniature hole drilling technology[J]. Transactions on Plasma Science, 2004, 32(5):2055-2061.
- [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] Andres U, Jirestig J, Timoshkin I. Liberation of minerals by high-voltage electrical pulses[J]. Powder Technol, 1999, 144: 37-49.
- [15] Wang Eric, Shi Fengnian, Emmy Manlapig. Experimental and numerical studies of selective fragmentation of mineral ores in electrical comminution[J]. International Journal of Mineral Processing, 2012, 112-113:30-36.
- [16] Razavian S M, Rezai B, Irannajad M, et al. Numerical simulation of high voltage electric pulse comminution of phosphate ore [J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2015, 25(3):473-478.
- [17] Li C P, Duan L C, Tan S C, et al. An electro breakdown damage model for granite and simulation of deep drilling by high-voltage electropulse boring [J]. Shock and Vibration, 2019:680-692.
- [18] Li H A, Zhang B B. Simulation study on dielectric materials broken by high voltage discharge[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2019, 43(3):320-325.
- [19] Lisitsyn I V, Inoue H. Use of inductive energy storage for electric pulse destruction of solid materials[J]. IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation, 1999, 6(1):105-108.
- [20] Kurets V I, Lopatin V V, Noskov M D. Influence of local heterogeneities on discharge channel trajectory at electric pulse destruction of materials[J]. Journal of Mining Science, 2000, 36(3):268-274.
- [21] Andres U. Development and prospects of mineral liberation by electrical pulses [J]. International Journal of Mineral Processing, 2010, 97(1):31-38.
- [22] Yan F Z, Lin B Q, Zhu C J, et al. Using high-voltage electrical pulses to crush coal in an air environment: An experimental study[J]. Powder Technology, 2016, 298:50-56.
- [23] 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.
- [24] Li C P, Duan L C, Tan S C, et al. Damage model and numerical experiment of high-voltage electro pulse boring in granite [J]. Energies, 2019, 12(4):727-736.
- [25] 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 V F, DUAN Longchen. Research progress of electro pulse boring rock breaking technology [J]. Geological Science and Technology Information, 2018, 37(6):298-304.

(编辑 李艺)