

高压电脉冲破岩钻进影响因素数值化仿真研究

李昌平¹, 段隆臣^{2*}, 张 棣³, 杨宏俊¹

(1. 中国地质大学(武汉)机械与电子信息学院, 湖北 武汉 430074; 2. 中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉 430074; 3. 中国地质大学(武汉)未来技术学院, 湖北 武汉 430074)

摘要:随着深部资源开发需求增长, 高压电脉冲破岩技术因其高效、环保优势成为钻探领域的研究热点。本文首先建立了高压电脉冲破岩钻进多物理场耦合模型, 设计了同轴圆柱式、多电极对式及电极交叉式三种钻头结构。然后仿真分析研究了钻头电极结构对高压电脉冲破岩效果的影响规律, 得出同样电参数及岩石特性下最优的钻头电极结构。最后基于最优的同轴圆柱式电极结构钻头, 仿真研究了钻头直径、施加电压、钻头高压电极形状及岩石介电常数等分别对岩石内部及表面电场强度的影响规律。研究表明, 同轴结构明显使电场分布更集中且破碎区域从中心向外部扩展更均匀, 同轴结构在破碎岩石方面更有优势。同时得出了钻头直径等分别对岩石表面及内部电场影响规律。本研究为高压电脉冲破岩钻头优化设计提供了设计依据, 对推动该技术的工程应用具有一定的指导意义。

关键词:高压电脉冲破岩; 电场强度; 钻头结构; 岩石介电常数

中图分类号: P634 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2025)S1-0070-07

Numerical simulation study on the impact of high-voltage electric pulses on rock breaking during drilling

LI Changping¹, DUAN Longchen^{2*}, ZHANG Di³, YANG Hongjun¹

(1. School of Mechanical and Electronic Information, China University of Geosciences, Wuhan Hubei 430074, China; 2. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan Hubei 430074, China; 3. School of Future Technology, China University of Geosciences, Wuhan Hubei 430074, China)

Abstract: As the demand for deep resource exploration increases, high-voltage electric pulse rock-breaking technology has emerged as a focal research area in the drilling field, driven by its efficiency and environmental advantages. This study first establishes a multi-physical field coupling model for high-voltage electric pulse rock-breaking drilling. Three distinct drill bit configurations are designed, including coaxial cylindrical, multi-electrode pair, and electrode-crossing arrangements. Simulation were conducted to investigate the impact of drill bit electrode structures on the effectiveness of high-voltage electric pulse rock-breaking, identifying the optimal electrode configuration under identical electrical parameters and rock characteristics. Based on the optimal coaxial cylindrical electrode structure, further simulations were performed to examine how factors such as drill bit diameter, applied voltage, high-voltage electrode shape, and rock dielectric constant influence the electric field strength within and on the surface of the rock. The results demonstrate that the coaxial structure provides a more concentrated electric field distribution, with the fracture area expanding more evenly from the center to the outer layers. Therefore, the coaxial structure exhibits distinct advantages

收稿日期: 2025-05-23; 修回日期: 2025-07-23 DOI: 10.12143/j.ztgc.2025.S1.011

基金项目: 国家重点研发计划课题“滑坡岩土体结构与物理力学参数随钻内窥测量系统”(编号: 2023YFC3007003); 国家自然科学基金面上项目“不同结构高压电脉冲钻头的破岩过程与预测模型研究”(编号: 42272366)

第一作者: 李昌平, 男, 汉族, 1990年生, 副教授, 机械工程专业, 博士, 主要从事高压电脉冲破岩机具及工艺研究工作, 湖北省武汉市洪山区鲁磨路388号, lichangpingcug@126.com。

通信作者: 段隆臣, 男, 汉族, 1967年生, 教授, 地质工程专业, 博士, 主要从事深部地质工程教学与科研工作, 湖北省武汉市洪山区鲁磨路388号, duanlongchencug@163.com。

引用格式: 李昌平, 段隆臣, 张棣, 等. 高压电脉冲破岩钻进影响因素数值化仿真研究[J]. 钻探工程, 2025, 52(S1): 70-76.

LI Changping, DUAN Longchen, ZHANG Di, et al. Numerical simulation study on the impact of high-voltage electric pulses on rock breaking during drilling[J]. Drilling Engineering, 2025, 52(S1): 70-76.

for rock breaking. Additionally, the study reveals the influence of drill bit diameter and other factors on the electric field distribution both on the surface and within the rock. This research provides a critical design basis for optimizing high-voltage electric pulse rock-breaking drill bits, offering valuable guidance for advancing the practical application of this technology in engineering contexts.

Key words: high-voltage electric pulse rock-breaking; electric field strength; drill bit structure; rock dielectric constant

0 引言

随着全球能源资源需求持续增长,易开采油气资源日益减少,资源开发正逐渐向深井和超深井延伸^[1-2]。在深井、超深井钻进过程中,面临硬岩、高温高压等严苛的地质条件,传统的机械钻进方式会出现钻头损耗高、钻速低、能耗与成本高等问题^[3-4]。高压电脉冲破岩技术是将高压能量在微秒级别下注入岩石内部,从而使岩石在高压脉冲电场作用下被击穿,在其内部生成击穿放电通道,通道进一步快速热膨胀产生冲击波,致使岩石受到拉张力破碎^[5-6],具有破岩效率高、能量损耗低等优点。在深井和超深井钻进过程中,高压电脉冲破岩技术在复杂环境适应性、破岩效率、能耗及绿色环保等方面具有一定优势。高压电脉冲破岩可分为电击穿和电破碎过程,电击穿和电破碎过程受多种因素影响^[7],掌握高压电脉冲破岩钻进过程中各因素的影响规律,对提高高压电脉冲破岩效率,减少破岩过程中能量损耗以及促进高压电脉冲破岩工程化应用具有重要意义。

在电极结构研究方面,孔二伟等^[8]建立了针-针电极结构模型,研究了电压、岩石矿物成分及孔隙率对高压电脉冲破岩电场分布的影响。Ushakov等^[9]将钻头设计为高低压多电极对结构,可产生多个电压脉冲,从而改变了底部岩石的破坏条件。Kusaiynov等^[10]将钻头设计成锯齿状,用以实现钻头的两个电极和岩石表面之间的点面接触。Lehmann等^[11]采用正负电极交叉结构式钻头在花岗岩中实现了全面钻进。高效、低能耗电脉冲钻头设计技术是阻碍高压电脉冲破岩工程化进程的重要因素之一,目前国内外学者致力于针对电极的高压电脉冲破岩仿真或高压电脉冲破岩钻进的试验研究,设计的钻头结构形式多样,但钻头设计缺乏理论依据。在电脉冲破岩影响因素分析研究方面,刘伟吉等^[12]通过多物理场耦合模型和实验验证发现,电极倾角为 $35^{\circ}\sim 55^{\circ}$ 时同时增大电压和间距可优化破岩效果。饶平平等^[13]建立了高压电脉冲-水力压裂耦合

数值模型,系统分析了放电电压、主应力差和注入速率对裂缝扩展的影响规律。程晋等^[14]基于动态电损伤模型,结合高压脉冲电源参数,系统分析了岩石相对介电常数、泊松比、弹性模量及密度对电脉冲破岩效果的影响规律。白丽丽等^[15]建立岩石孔隙电场模型,揭示孔隙特征对电脉冲破岩的影响规律。祝效华等^[16]研究指出脉冲放电电压越大,岩石发生电损伤的累积向更深处发展,更有利于破碎硬岩,但过大的脉冲放电电压可能伴随着严重的电极烧蚀问题。何建岐^[17]建立了高压电脉冲破岩模型,探究高压电脉冲电极电压、电极间距、岩石特性及液体介电常数对高压电脉冲破岩的影响规律。Yudin等^[18]进行了脉冲极性对钻进效率影响的试验研究,证明脉冲电压极性对击穿通道的形成有显著影响。

高压电脉冲破岩在多物理场多介质条件下进行,破岩过程受多种因素影响,为了提高电脉冲钻头破岩效率及能量利用率,需对各因素对高压电脉冲钻进破岩影响进行量化分析与研究。本文针对影响高压电脉冲破岩效能的多种关键因素,建立基于COMSOL Multiphysics的多物理场耦合模型并开展系统性仿真研究。研究变量涵盖钻头直径(60~100 mm)、脉冲电压(90~150 kV)、高压电极结构(同轴圆柱式/多电极对式/电极交叉式)及其几何参数、岩石介质不同介电特性等核心参数。本研究为高压电脉冲破岩钻头设计提供理论指导,对推动该技术的工程应用具有一定的指导意义。

1 高压电脉冲破岩过程及原理

高压电脉冲放电破岩方法可分为电脉冲破岩和液电效应破岩,高压电脉冲破岩为直接破岩方式,具有破岩效率高、能量损耗低等优点。在国外,电脉冲破岩已经商业化应用于矿石粉碎、固体废物处理等领域。高压短脉冲施加在高低压电极上,其上升到峰值时间小于500 ns^[19-21],岩石发生电击穿,小的放电先导在岩石内部形成,放电先导发展到另

一个对电极时,等离子体通道连接着高低压电极,并形成主放电通道,此时电极间的电压迅速下降,而电路中的电流迅速增加。脉冲功率电源高压电容器上的能量被释放到等离子体通道中,并加热等离子体通道。等离子体通道因受热而膨胀,对等离子体通道周围的围岩起作用。当应力超过岩石的拉压强度时,岩石发生破裂。破碎岩石通过循环绝缘液体介质返回地面,从而实现钻进。高压电脉冲破碎过程如图1所示。

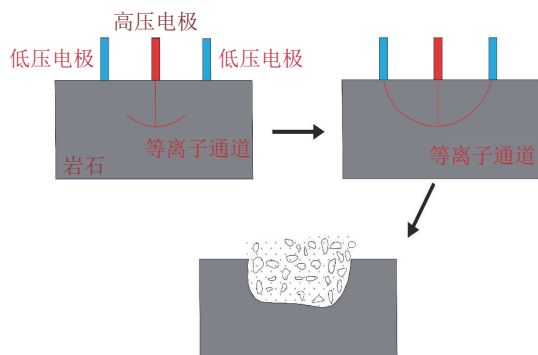


图1 高压电脉冲破碎岩过程示意

2 高压电脉冲破碎岩仿真实验及模型的建立

电脉冲破碎岩石过程中涉及电场、温度场、流场、应力场等,可以用COMSOL Multiphysics进行模拟分析。该软件基于有限元法,求解偏微方程(PDE)或偏微分方程组(PDES)来实现多物理场的模拟,同时可通过LiveLink™ for SolidWorks接口实现SolidWorks设计模型与Comsol仿真模型实时交互。电脉冲破碎时,根据放电弛豫理论,岩石放电弛豫时间远大于外部放电时间,可以采用AC/DC模块中的静电接口对电脉冲破碎进行数值模拟^[22-23]。同时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密切的关系,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。高压电脉冲破碎岩钻进放电模型基于麦克斯韦方程组进行求解,求解方程如下:

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (1)$$

$$\nabla \times B = 0 \quad (2)$$

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

$$\nabla \times D = \rho \quad (4)$$

式中: H ——电磁场强度, $A \cdot mm^{-1}$; J ——电流密度, $A \cdot mm^{-2}$; D ——电通量密度, $kV \cdot mm^{-1}$; t ——时间, s ; B ——磁感应强度, T ; E ——电场强度, $kV \cdot mm^{-1}$; ρ ——电荷密度, $C \cdot mm^{-3}$ 。

静电模块中,电通量密度可以忽略,方程式可变为:

$$\nabla \times H = J \quad (5)$$

几何向量场中旋度和散度在三维空间为零,可得出:

$$\nabla \times J = \nabla \cdot (\nabla \times H) = 0 \quad (6)$$

模拟模型中材料特性可通过如下构建模型进行定义:

$$D = \epsilon E \quad (7)$$

$$B = \mu H = \mu_r \mu_0 H \quad (8)$$

$$J = \sigma E \quad (9)$$

式中: ϵ ——介电常数; μ ——磁导率; μ_r ——相对介电常数; μ_0 ——绝对介电常数; σ ——电导率。

为了研究不同电极排布结构对电脉冲破碎的影响,设计3种钻头结构均采用同样的直径和同种结构的高压电极,如图2所示。电极采用不锈钢材料,模拟破碎对象为红砂岩,电极间绝缘介质为天然酯绝缘油,其击穿电场强度为300 kV/cm,绝缘性能好。

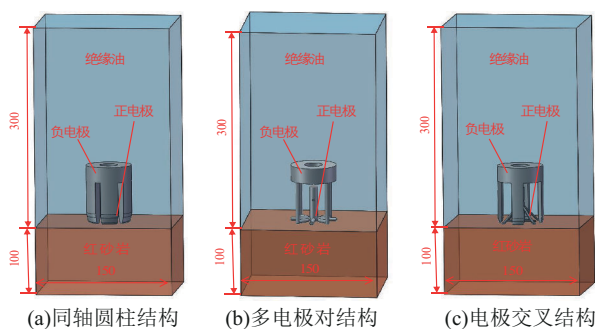
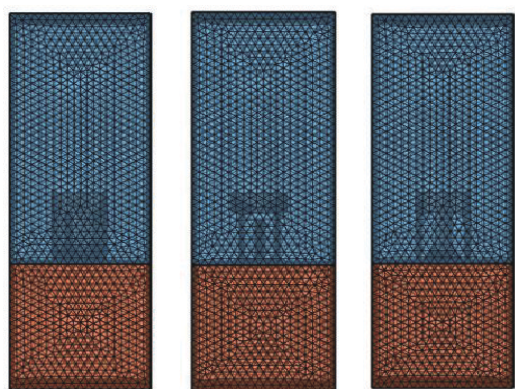


图2 3种结构钻头模拟模型

网格划分的好坏是决定后续模拟能否收敛、收敛结果是否正确的关键因素,对模型进行超细化网格划分,如图3所示。从图中可以看出,COMSOL Multiphysics 软件对岩石与气泡接触处边界网格划分进行细化,符合网格划分要求,可以求出较精细结果。模型岩石部分材料选用红砂岩,电导率为 $10^{-7} S/m$,相对介电常数为6。模型中绝缘介质部分选用天然酯绝缘油,相对介电常数为2.4。将钻头高

压电极的边界条件设置为高电势,下边缘边界条件设置为接地,钻头材料为304不锈钢,具有良好的导电率。



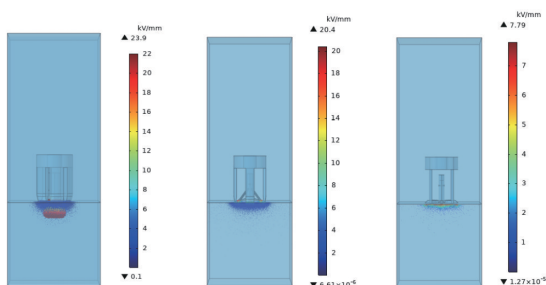
(a) 同轴圆柱结构 (b) 多电极对结构 (c) 电极交叉结构

图3 不同模拟模型网格划分

3 不同因素对高压电脉冲破岩效果影响分析

3.1 钻头电极结构的影响

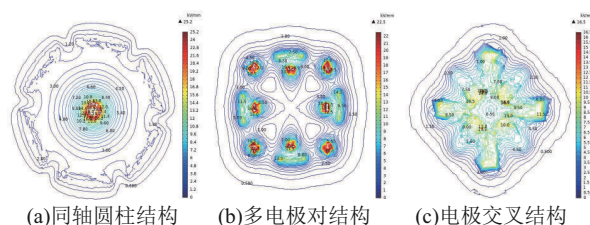
在模拟电极结构对电脉冲钻进的影响时,模拟并分析了3种不同电极布置结构钻头电脉冲钻进岩石表面与内部的电场强度和分布情况,模拟分析时将除电极布置结构外的其他参数设定为常数,其中钻头直径60 mm,介质为绝缘油。图4为不同电极布置结构钻头高压电脉冲钻进岩石内部电场分布,从电场分布可知,岩石内部电场强度在高压电极附近最大,离高压电极径向越远,电场强度越小。从图中可得出,同轴圆柱结构电极钻头主要分布在中心区域,电场强度集中,最大电场强度在3种结构中最大,为23.9 kV/mm。多电极对结构电极钻头最大电场强度次之,为20.4 kV/mm。电极交叉结构电极钻头电场分布均匀,最大电场强度为7.79 kV/mm,电场分布的深度较深。



(a) 同轴圆柱结构 (b) 多电极对结构 (c) 电极交叉结构

图4 三种结构电极钻头破碎红砂岩时内部电场分布

图5为不同电极布置结构钻头高压电脉冲钻进岩石表面电场等值线图,可以看出钻头直径60 mm时,同轴圆柱钻头中电场主要集中在中心区域,多电极对式钻头有更多的电场分布,电极交叉式钻头中电场分布更分散化,最大电场强度分别为25.2、22.5、16.5 kV/mm,依次递减。意味着同轴结构明显电场分布更集中且破碎区域从中心往外部扩展更均匀,即同轴结构破岩孔壁更完整且破岩效果更好。交叉电极式虽然电场分布更广泛,但其最大电场最小,且电场大部分分布在7~10 kV,平均电场小,在120 kV电压下,60 mm区域内并不能有效击穿红砂岩,因此其破岩效率最低。



(a) 同轴圆柱结构 (b) 多电极对结构 (c) 电极交叉结构

图5 不同电极布置结构钻头高压电脉冲钻进岩石表面电场等值线图

3.2 钻头直径的影响

为了模拟钻头直径对高压电脉冲破岩的影响,本研究采用同轴圆柱式钻头结构,将钻头直径设置为全局参数并进行参数化扫描。首先将同轴圆柱式钻头三维模型导入至COMSOL中,建立模型。接口设置完成后,对低压电极直径进行参数化扫描。参数化名称中选择与低压电极直径对应的COMSOL模型名称,参数值列表中分别设置:range(60[mm],4[mm],100[mm])。即正低压电极间距初始间距为60 mm,步长为4 mm,最大间距为100 mm,实现正低压电极间距连续变化,一共11组数据进行参数化扫描。

不同直径钻头在红砂岩表面电场强度变化曲线如图6所示,可以看出,随着钻头直径的增大,红砂岩表面最大电场强度逐渐变小,在直径60~100 mm范围内最大电场强度变化较大,红砂岩表面平均电场强度随钻头直径增大而增大,变化幅度较小。

钻头直径大小对高压电脉冲破岩钻进电场强度分布有一定影响。红砂岩表面最大电场强度随钻头直径的增大而减小,意味着随着钻头直径的增

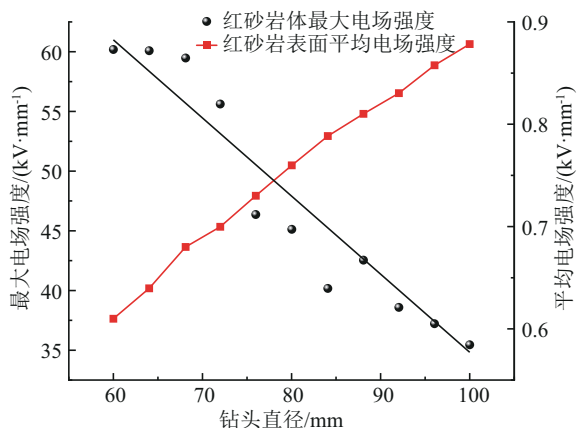


图6 不同直径钻头在红砂岩表面电场强度变化

大,高压电脉冲破碎红砂岩能力减弱。由图6得出,平均电场强度随钻头直径的增大而增大,意味着随着钻头直径的增大最大电场强度虽然变小,但径向红砂岩的破碎范围增大,可以破碎的红砂岩区域更大。因此在保证破碎能力、破碎深度及破碎范围的基础上,高压电脉冲破岩钻进时需选择合适的钻头直径。

3.3 施加电压的影响

在高压电脉冲破碎岩石过程中,施加脉冲电压大小对岩石的破碎起到关键作用。在模拟中,采用60 mm同轴结构式钻头,分别施加90、120、150 kV脉冲电压进行模拟分析。图7为钻头与岩石表面电场分布情况,箭头的颜色、大小表示电场强度和方向。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。磁通量总是沿高电势向低电势方向流动,通量之间的距离代表电荷浓度,距离越短,电荷浓度越高。可得出在同轴结构下岩石表面电场较均匀,由高压电极指向低压电极,且靠近高压电极附近电场最大,随着距离的增加电场逐渐减弱。

图8为施加不同电压时岩石内部电场强度分布。可以看到,随着脉冲电压的增大,岩石内部最大电场强度、中心场强随之增大,从而使高压电脉冲破碎岩石的效率增大。但随着脉冲电压的增加,岩石的电击穿单次脉冲所需能量增加,从而使得电击穿能量利用率降低。在实际应用中,由于岩石电击穿场强为一定值,若采用过低的电压就不能有效击穿岩石形成等离子通道,导致不能有效破碎岩石而效率低下,若采用过高的电压不仅会导致能量冗余,降低能量利用率,不利于资源有效利用,多余的

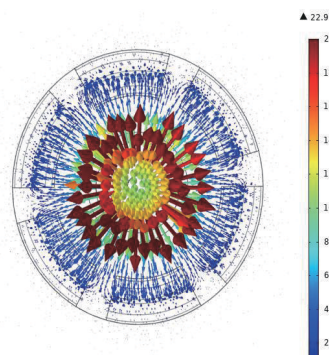


图7 钻头与岩石表面电场分布

能量还会传递至钻具致使钻具超过其承载的极限而破坏。所以应在已知的岩石性质以及钻具所能承受的能量极限的前提下选择施加合适的电脉冲电压。

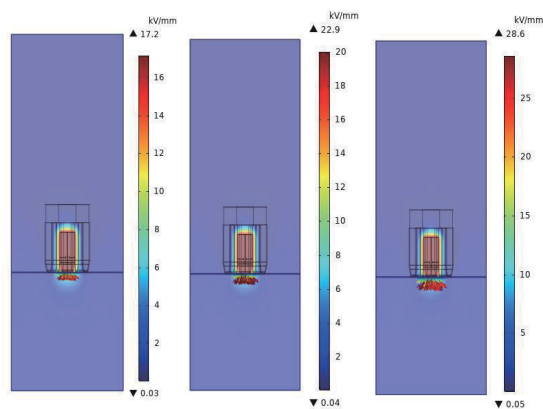


图8 施加不同电压岩石内电场强度分布

3.4 钻头电极形状的影响

由不同电极结构模拟结果可知,3种电极排布方式中同轴圆柱式钻头的效果最好,且更方便试验操作,因此选用同轴圆柱式钻头进行高压电极形状的模拟研究。为了分析高压电极形状对高压电脉冲破岩的影响,可以简化成高压电极与岩石接触面积来研究其不同的破岩效果。在模拟中分析同轴圆柱式电极钻头中高压电极形状对电脉冲钻进的影响,可以对高压电极与岩石接触的角度进行参数化扫描,参数值列表设置:range(51[deg],2[deg],90[deg]),即电极锥角初始夹角为51°(高压电极中心轴与底部锥面角度),步长为2°,极限角度为90°,得到高压电极形状连续变化时岩石内部的电场变化。图9为高压电极在COMSOL中建立的模型,其中岩石为红砂岩,上部介质为绝缘油,模拟中只改

变钻头结构中高压电极与红砂岩表面的角度。

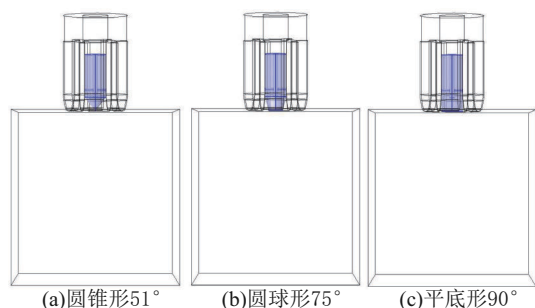


图9 高压电极锥角模型

不同高压电极角度在红砂岩表面电场强度变化如图10所示,由图可知,岩石表面最大电场强度随夹角的变大而变小,夹角为 51° 时,红砂岩表面最大电场强度为 29.8 kV/mm ,其表面平均电场强度随夹角的变大而变大。

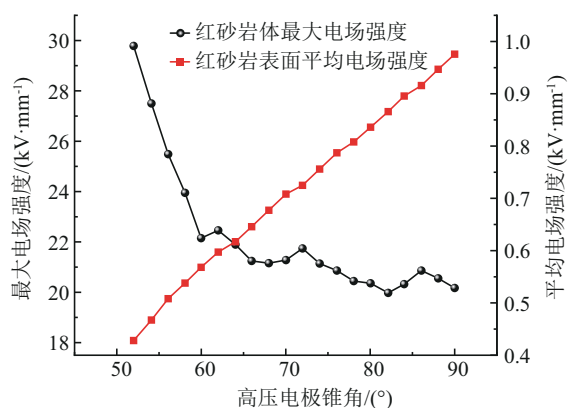


图10 不同高压电极角度在红砂岩表面电场强度变化

不同高压电极形状电极钻头高压电脉冲破岩钻进红砂岩内部电场如图11所示,从图中可知,高压电极底部为圆锥形时内部电场强度最大,最大电场为 29.2 kV/mm ,电场深度最深,但其电场分布不均匀。高压电极底部为圆球形时内部电场分布均匀,最大电场为 23.9 kV/mm 。高压电极底部为平面形时最大电场为 21.4 kV/mm ,电场分布最浅。

综上所述,当高压电极角度为 51° 时,高压电脉冲破碎红砂岩能力最强,其破岩深度最大,但对高压电脉冲破岩钻进范围及径向面积最小;当高压电极角度为 75° 时,岩石内最大电场强度较小,破岩深度比 51° 较浅,但岩石内电场分布较均匀,破岩范围及径向面积较大;当高压电极角度为 90° 时,岩石内最大电场强度最小,破岩深度最浅,但破岩范围及

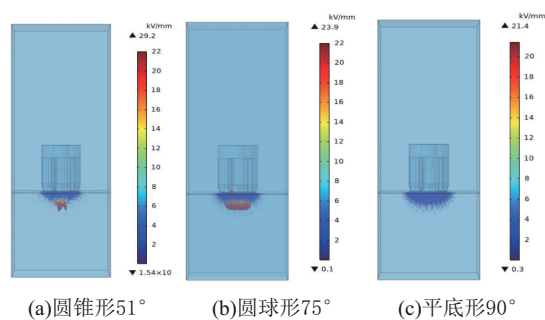


图11 不同高压电极形状电极钻头高压电脉冲破岩钻进红砂岩内部电场

径向面积最大。因此,在实际应用中需综合考虑破岩效率、电极加工难度与装配精度,选择合适的高压电极形状。

3.5 不同岩石介电常数的影响

为了研究不同岩石矿物成分对高压电脉冲破岩的影响,模拟时选择施加电压为 120 kV ,液体介质为绝缘油,介电常数为 2.4 。由于岩石成分的复杂性在仿真中并不能有效模拟,不同岩石的介电常数不同,本研究模拟介电常数不同、其他参数相同的3种不同矿物。图12为矿物成分对电场强度分布影响。

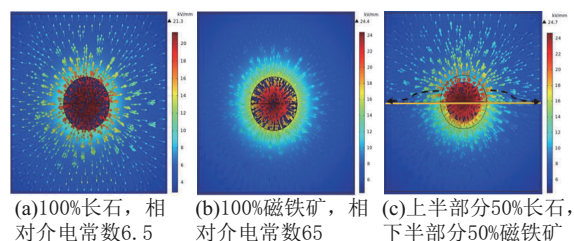


图12 矿物成分对电场强度分布影响

可以看出不同的介电常数导致内部最大电场强度的不同。图12(b)与12(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。图12(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,且电场能量密度明显相较于其他区域密集,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。

4 结论

本文主要针对高压电脉冲破岩过程中不同影响因素进行研究,旨在为高压电脉冲破岩钻头设计提供理论参考。首先通过COMSOL Multiphysics软件建立高压电脉冲破岩多物理场耦合模型并进行仿真分析研究,系统研究了钻头直径、脉冲电压、电极结构与角度、岩石介电常数及成分对破岩效果的影响规律。主要得出以下结论:

(1)不同电极结构内部电场分布不同,同轴圆柱钻头中电场主要集中在中心区域,多电极对式钻头有更多的电场分布,电极交叉式钻头中电场分布更分散化。意味着同轴结构明显电场分布更集中且破碎区域从中心往外部扩展更均匀,同轴结构在破碎岩石方面更有优势。

(2)红砂岩表面最大电场强度随钻头直径的增大而减小,但直径越大径向红砂岩的破碎范围越大,可以破碎的红砂岩区域更大。施加不同电压,随着脉冲电压的增大,岩石内部最大电场强度、中心场强随之增大,从而使高压电脉冲破碎岩石的效率增大。

(3)红砂岩表面最大电场强度随高压电极角度的增大而减小,表面平均电场强度随角度的增大而增大,但增长幅度较小。红砂岩内部电场强度在高压电极附近最大,离高压电极径向越远,电场强度越小。不同的介电常数导致内部最大电场强度不同,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。

参考文献:

- [1] 苏义脑, 窦修荣, 高文凯, 等. 油气井随钻测量技术发展思考与展望[J]. 石油科学通报, 2023, 8(5): 535-554.
- [2] 苏义脑. 井下控制工程学概述及其研究进展[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(4): 705-712.
- [3] 孙金声, 杨景斌, 吕开河, 等. 致密油气钻井液技术研究现状与展望[J]. 其他石油学报, 2025, 46(1): 279-288.
- [4] 孙金声, 蒋官澄, 贺根博, 等. 油基钻井液面临的技术难题与挑战[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2023, 47(5): 76-89.
- [5] 马宁, 邓岳, 凌雪, 等. 高压脉冲放电在大直径扩底灌注桩中的应用技术研究[J]. 钻探工程, 2024, 51(6): 152-159.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] Ushakov V Y, Vajov V F, Zinoviev N T. Electro-Discharge Technology for Drilling Wells and Concrete Destruction [M]. Cham: Springer International Publishing AG, 2018.
- [10] Kusaynov K, Nussupbekov B R, Shuyushbayeva N N, et al. On electric-pulse well drilling and breaking of solids[J]. Technical physics. 2017, 62(6): 867-870.
- [11] Lehmann F, Anders E, Voigt M, et al. Electric impulse technology-long run drilling in hard rocks [J]. Oil Gas European Magazine. 2015, 41(1): 42-45.
- [12] 刘伟吉, 张有建, 祝效华, 等. 高压电脉冲破岩机理数值模拟研究[J]. 矿业科学学报, 2023, 8(5): 642-653.
- [13] 饶平平, 宁肯, 崔纪飞. 高压电脉冲-水力压裂耦合过程中岩体缝间扰动规律[J]. 地质科技通报, 2025, 44(1): 90-100.
- [14] 程晋, 乔汉, 李星月, 等. 电脉冲破岩钻井地层主要参数敏感性分析[J]. 石油机械, 2024, 52(1): 20-28.
- [15] 白丽丽, 李铮, 王营, 等. 岩石孔隙性质对电脉冲破岩的影响规律[J]. 特种油气藏, 2021, 28(1): 148-153.
- [16] 祝效华, 陈梦秋, 刘伟吉. 高压电脉冲破碎非均质花岗岩数值模拟[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2024, 48(5): 151-159.
- [17] 何建岐. 高压电脉冲破岩电击穿影响规律研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- [18] Yudin A S, Zhurkov M Y, Martemyanov S M, et al. Electrical discharge drilling of granite with positive and negative polarity of voltage pulses[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2019, 123: 104058.
- [19] 刘伟吉, 张有建, 祝效华, 等. 影响高压电脉冲破岩效率的关键因素分析[J]. 天然气工业, 2023, 43(10): 112-124.
- [20] 肖一标, 段隆臣, 李昌平, 等. 基于高压电脉冲破岩损伤模型的破岩过程研究[J]. 地质科技通报, 2023, 42(3): 323-330.
- [21] 李欣冉, 饶珂嘉, 苏贺, 等. 等离子冲击波作用下红砂岩的动态破裂行为试验与数值模拟研究[J]. 有色金属(矿山部分), 2024, 76(3): 170-177.
- [22] 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.
- [23] 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.

(编辑 王跃伟)