

孔内液相放电等离子体与金属丝电爆炸破碎软岩特征差异性研究*

叶志伟^{1,2}, 傅世民¹, 杨建华^{1,2}, 刘达³, 彭超¹, 冷振东⁴

(1.南昌大学工程建设学院, 江西 南昌 330031;

2.南昌大学水工岩土工程安全江西省重点实验室, 江西 南昌 330031;

3. 江西省水利科学院, 江西 南昌 3300292;

4. 易普力股份有限公司, 湖南 长沙 410221)

摘要: 孔内液相放电等离子体与金属丝电爆炸破岩是高压脉冲放电破岩技术的两种主流应用形式。本文通过集成高压脉冲放电装置、放电参数同步测量及高速摄影记录模块的试验系统, 开展 7~10kV 充电电压下两种破岩模式的对比试验, 系统分析二者在破岩效果与能量耗散方面的差异。结果表明, 液相放电等离子体破岩的表面裂纹密度、新增表面积随电压升高单调递增, 平均块度单调递减; 而金属丝电爆炸破岩的表面裂纹密度与新增表面积呈先增后减趋势, 平均块度则呈先减后增特征。两种破岩模式下试样表面裂纹分形维数均随电压升高而增大, 且金属丝电爆炸的裂纹网络更复杂。随充电电压升高, 液相放电等离子体破岩的能量沉积效率从 7kV 的 55.37% 单调上升至 10kV 的 69.43%; 而金属丝电爆炸破岩的沉积效率呈先增后减趋势, 从 7kV 的 59.78% 升至 9kV 的 67.47% 后, 于 10kV 降至 52.96%。此外, 电压由 7kV 升至 10kV 时, 液相放电等离子体破岩破碎能占沉积能比例从 7.53% 降至 4.77% (占电容储能 4.17% → 3.32%), 而金属丝电爆炸破岩中其从 8.08% 降至 6.62% (占电容储能 4.83% → 2.98%)。这表明金属丝电爆炸破岩的沉积能向破碎能转化效率更高。金属丝电爆炸在 10kV 时的沉积能量不足, 是造成其破岩效果在该电压下反而劣化, 从而与液相放电等离子体破岩效果随电压持续提升的趋势产生分化的直接原因。研究成果对高压脉冲放电破岩模式选择与参数优化具有重要指导意义。

关键词: 液相放电; 等离子体; 金属丝电爆炸; 岩石破碎; 能量

中图分类号: O382

国标学科代码: 13035

文献标识码: A

Differences between downhole liquid-phase discharge plasma and wire explosion in the characteristic of soft rock fragmentation

YE Zhiwei^{1,2}, FU Shimin¹, YANG Jianhua^{1,2,*}, LIU Da³, PENG Chao¹, LENG Zhendong⁴

(1. School of Infrastructure Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, Jiangxi, China;

2. Jiangxi Provincial Key Laboratory of Hydraulic Geotechnical Engineering Safety, Nanchang University, Nanchang 330031, Jiangxi, China;

*收稿日期: 2026-03-19; 修回日期: 2026-06-17;

基金项目: 国家自然科学基金(52509147, 52469020); 江西省自然科学基金(20253BAC260006, 20242BAB26075)

第一作者: 叶志伟(1994—), 男, 博士, 讲师. E-mail: yezhiwei@ncu.edu.cn;

通信作者: 杨建华(1986—), 男, 博士, 教授. E-mail: yangjianhua86@ncu.edu.cn.

Abstract: Downhole liquid-phase discharge plasma rock breaking and wire explosion are the two primary implementations of high-voltage pulsed discharge technology for rock fragmentation. The aim of this study is to systematically compare the rock fragmentation performance and energy dissipation between the two methods. Homogeneous cubic cement mortar specimens, each with a side length of 200 mm and a prefabricated central borehole measuring 20 mm in diameter and 120 mm in depth, were used to simulate soft rock in laboratory experiments. A test system was constructed, consisting of a high-voltage pulse discharge device, a discharge-parameter measurement module, and a high-speed photography module. The high-voltage pulse discharge device features a 250 μF capacitor with an adjustable charging voltage range of 0-100 kV, which was used to apply high-voltage pulses to the specimens. Concurrently, the discharge-parameter measurement module recorded current and voltage waveforms, enabling comparison of the differences in energy transfer processes between the two methods. Simultaneously, the high-speed photography module captured the dynamic failure process of the specimens under shock wave loading, facilitating analysis of differences in crack propagation. In the tests, needle-needle electrodes with a fixed electrode spacing of 10 mm were inserted into boreholes and served as the discharge electrodes for generating high-voltage pulses. Four charging voltages of 7 kV, 8 kV, 9 kV, and 10 kV were used as experimental variables to compare the characteristics of soft rock fragmentation between downhole liquid-phase discharge plasma and wire explosion. High-speed photography was employed to analyze and compare crack propagation behaviors between the two methods. Quantitative assessments of surface crack density and fractal dimension were conducted to characterize crack morphology differences in the processed specimens. Statistical analysis of fragment size distribution and specific surface area further revealed distinctive fragmentation characteristics. Additionally, on the basis of the dynamic processes of energy release and transfer in rock fragmentation via high-voltage pulse discharge and the relationship between newly created surface area and fragmentation energy in fracture mechanics, time-history current and voltage data were utilized to quantify the downhole deposited energy distribution and fragmentation energy allocation efficiency. The results show that, for rock fragmentation by liquid-phase discharge plasma, the surface crack density and newly created surface area increase monotonically with the increase of charging voltage, while the average fragment size presents a monotonically decreasing trend. For rock fragmentation by wire explosion, however, the surface crack density and newly created surface area increase first and then decrease, with the average fragment size showing an inverse trend. The fractal dimension of specimen surface cracks increases with the rising voltage for both methods, with wire explosion generating a more complex crack network. As charging voltage increases from 7 kV to 10 kV, the energy deposition efficiency for rock fragmentation by liquid-phase discharge plasma increases from 55.37% to 69.43%, whereas for rock fragmentation by wire explosion, it rises from 59.78% at 7 kV to a peak of 67.47% at 9 kV before sharply dropping to 52.96% at 10 kV. Meanwhile, the fraction of rock fragmentation energy within deposited energy declines from 7.53% to 4.77% for liquid-phase discharge plasma, which accounts for 3.32%–4.17% of the total energy stored in the capacitor. For wire explosion, the fraction declines from 8.08% to 6.62%. The corresponding value accounts for 2.98%–4.83% of the total energy stored in the capacitor. This demonstrates that the wire explosion technique delivers a higher conversion efficiency from deposited energy to rock fragmentation energy. At 10 kV, the insufficient deposited energy generated by wire explosion directly degrades its rock-breaking performance at this voltage, which deviates from the consistent upward trend of rock fragmentation efficacy observed in liquid-phase discharge plasma as the applied voltage rises. The findings offer valuable guidance for the method selection and parameter optimization of high-voltage pulse discharge for rock fragmentation.

Keywords: liquid-phase discharge; plasma; wire explosion; rock breaking; energy

水利、交通、矿山等工程领域存在大规模岩体开挖需求，传统钻孔爆破技术虽应用广泛，但固有的安全风险高、过程可控性弱、环境扰动剧烈等瓶颈问题突出，其应用场景受环保与安全规范的制约日益显著。在此背景下，高压脉冲放电破岩技术凭借电能精准调控、本质安全、绿色环保的核心优势，成为推动岩体开挖技术向高效化、智能化、绿色化转型的关键前沿方向。

高压脉冲放电破岩借助高功率脉冲电源,在微秒至纳秒尺度内释放巨量电能,诱导放电载体发生剧烈相变或介质击穿,形成高温高压等离子体并辐射强冲击波,进而实现岩体破碎。依据等离子体通道的生成机制与空间分布特征,该技术主要分为三类:液相放电等离子体破岩(电极间为液相介质)^[1]、金属丝电爆炸破岩(电极间为金属丝)^[2]及岩体内电击穿破岩(电极间为岩体)^[3]。其中,液相放电等离子体与金属丝电爆炸破岩具备关键共性特征:等离子体生成与能量释放均发生于液体介质中,天然适配钻孔充液工况。通过将放电电极置于钻孔液体中,可构建孔内约束放电模式,充分利用钻孔的空间导向与约束效应,显著提升冲击波能量利用率与破碎范围可控性。相较于自由水域放电或无约束固体击穿,孔内约束放电在大规模岩体开挖、精确轮廓成形及局部区域精准致裂方面优势显著,已成为高压脉冲放电破岩技术的主流应用形式与核心研究热点^[4-6]。值得注意的是,尽管液相放电等离子体与金属丝电爆炸破岩的原理相近,但因等离子体通道形成及其与液体的动力学作用过程存在差异^[7],导致二者在破岩效果上存在显著差异。因此,深入揭示二者的破岩特征差异,对于不同复杂工程环境下的技术选型与参数优化,具有重要的理论价值与工程指导意义。

目前,众多研究人员分别针对液相放电等离子体与金属丝电爆炸破岩特征开展了较为系统的研究。理论分析层面,基于基尔霍夫电路方程、能量守恒方程、等离子体状态方程及电极间时变电阻模型,可求解等离子体通道压力时程曲线^[8];进而解析等离子体-液体介质动力学作用过程,获取液体中初始冲击波特征参数^[9];基于液电冲击波衰减规律与冲击波透射理论^[10],确定孔壁入射冲击波关键参数。在此基础上,借鉴爆炸荷载时程经验描述方法构建孔壁压力荷载曲线^[11],结合岩石动态应力场分布与破坏准则^[12-13],可揭示钻孔围岩动态应力场演化规律与破坏分区特征^[14]。两类技术的理论模型差异,主要源于等离子体状态方程与电极间时变电阻特性的不同。尽管现有研究已构建起基本理论分析框架,但所采用的关键参数多为特定脉冲功率电源下的试验拟合公式,通用性较差,难以直接支撑液相放电等离子体与金属丝电爆炸破岩特征的定量对比分析。

高压脉冲放电破岩涉及等离子体生成、冲击波传播与岩体动态破坏的多物理场耦合非线性过程,机理极为复杂。早期数值模拟多采用冲击波能量等效^[15]或荷载等效^[16]的简化方法分析破岩特征,但其局限性与前述理论研究一致:在外部工况统一条件下,液相放电等离子体与金属丝电爆炸的等离子体能量沉积规律、冲击荷载特性尚不明确,难以实现两种破岩方式的定量对比分析。近年来,多场耦合数值模拟已初步应用于该领域^[17-18],但受计算效率与数值收敛性限制,现有研究仍主要局限于二维小尺度模型。

鉴于现有理论分析与数值模拟方法存在上述局限,室内试验成为揭示液相放电等离子体与金属丝电爆炸破岩特征的核心研究手段。在液相放电等离子体破岩试验研究中,学者们采用CT扫描、宏观形貌检测等技术,已揭示放电电压^[19-20]、孔内水压^[21]、地应力^[22]、放电次数^[23]等单因素或多因素耦合作用下的岩体破碎开裂特征;在金属丝电爆炸破岩领域,则系统探究了放电电压^[24]、金属丝材料^[25]、直径及长度^[26]等关键参数对岩体破碎效果的影响规律。然而,现有研究多聚焦于单一技术的独立分析,尚未开展针对两种破岩方式的系统对比试验,难以揭示其破岩特征的本质差异。

针对现有研究尚未系统揭示液相放电等离子体与金属丝电爆炸破岩特征差异的问题,本文搭建集成高压脉冲放电单元、放电参数同步测量单元及高速摄影观测单元的一体化试验系统,定量对比分析两种破岩方式的作用特征差异,揭示放电电压对破岩特征差异的影响机制。研究成果可为高压脉冲放电破岩技术的工程选型与参数优化提供理论依据与技术参考。

2 试验方案

2.1 试样特征

本研究采用预制水泥砂浆试块作为岩石替代材料进行破岩试验,其均质性好、力学参数可控且可重复性强,能够有效排除天然岩石非均质性、裂隙发育等因素对破岩特征对比研究的干扰,满足本试验研究需求。预制水泥砂浆试块采用质量比P·O 42.5级硅酸盐水泥:标准细沙:水=1:3.4:0.6配制,

其形状为立方体，边长为 200 mm，并于顶面中心沿轴线预制有直径 20 mm、深度 120 mm 的圆孔。试样的静态单轴抗压强度通过对 $\phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 的标准圆柱体试件匀速施加轴向压力测定，其动态抗压强度采用霍普金森杆（SHPB）设备对边长为 50mm 立方体试件以 0.4MPa 冲击气压沿单轴方向冲击加载获取，断裂比能则通过公式 (1) [27] 确定。

$$\lambda = \frac{W_L}{S} \quad (1)$$

式中： λ 为断裂比能； W_L 为耗散能； S 为新增表面积。

试件的静态与动态单轴压缩试验结果如图 1 所示，相关物理力学参数见表 1。

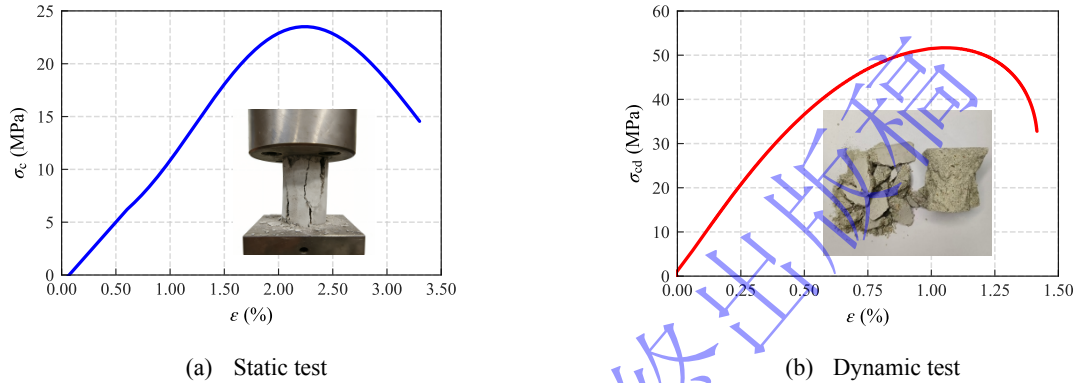


图 1 试样静态与动态单轴压缩试验结果

Fig.1 Results of static and dynamic uniaxial compression tests on specimens

表 1 试样物理力学参数

Table1 Physical and mechanical parameters of specimens

密度 ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性波速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	静态抗压强度 /MPa	弹性模量 /MPa	泊松比	动态抗压强度/MPa	断裂比能/ ($\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}$)
2060	3800	24	25	0.20	52	0.87

2.2 试验设备

为揭示孔内液相放电等离子体与金属丝电爆炸在破岩过程、裂纹形态、破碎特征、能量耗散等方面的差异，本文搭建了专用的孔内高压脉冲放电破岩试验系统，该系统主要包括高压脉冲放电装置、放电参数同步测量模块及高速摄影记录模块，如图 2 所示。高压脉冲放电装置主要由变压器、整流器、高压电容器组、三电极开关、电缆线及电极反应器构成。放电参数同步测量模块包含高压探头、电流探头及示波器。高速摄像记录模块则主要由高速摄像机、补光装置及图像采集与存储设备组成。

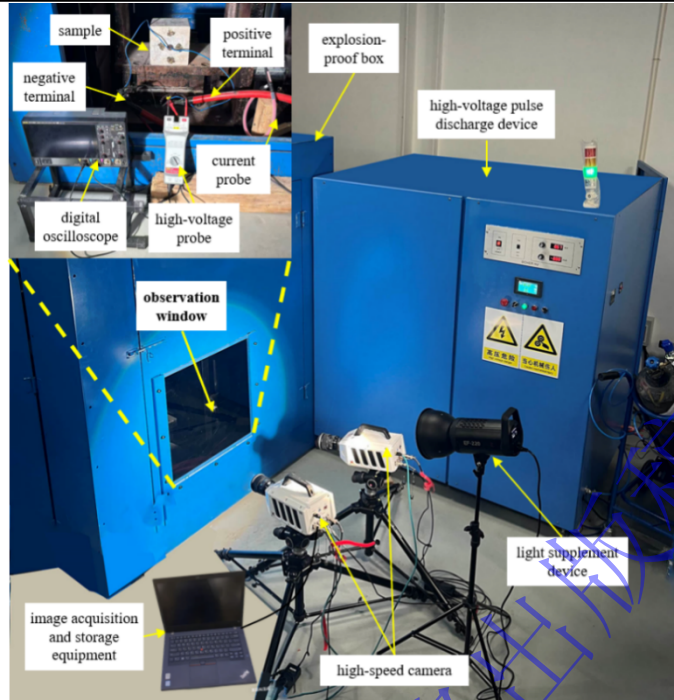
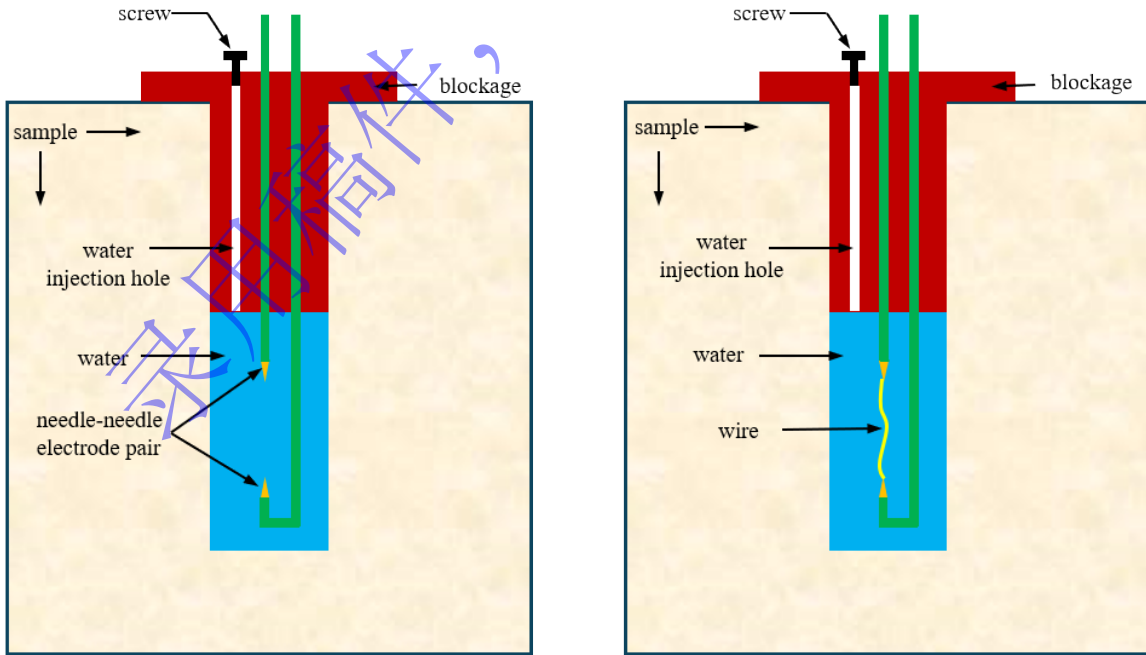


图 2 孔内高压脉冲放电破岩试验系统

Fig.2 Test system for rock breaking by high-voltage pulse discharge in borehole

电极反应器由金属堵塞和两根带绝缘外皮的铜电极构成。铜电极插入堵塞的孔中，其裸露端形成针-针电极对。当电极间为液体介质时，为液相放电等离子体破岩试验；当用金属丝连接电极时，为金属丝电爆炸破岩试验，如图 3 所示。试验系统采用 $250\mu\text{F}$ 电容储能，充电电压在 $0\sim 25\text{ kV}$ 范围内连续可调。采用金属丝电爆炸模式时，以直径 0.4 mm 铜丝桥接电极。电压与电流探头量程分别为 $0\sim 50\text{ kV}$ 和 $0\sim 60\text{ kA}$ ，示波器实时采样率最大为 4 GSa/s ，高速摄像机帧率最高达 10 万 fps 。



(a) Liquid-phase discharge plasma rock breaking

(b) Wire explosion rock breaking

图 3 液相放电等离子体与金属丝电爆炸破岩示意图

Fig.3 Schematic diagram of rock breaking by liquid-phase discharge plasma and wire electrical explosion

2.3 试验工况与流程

充电电压与电极间距是影响孔内高压脉冲放电破岩效果的主要因素。受试样尺寸限制，电极间距难以设置合理梯度，因此本研究聚焦充电电压对液相放电等离子体与金属丝电爆炸破岩特征差异的影响。基于试验装置条件与安全性考量，设定充电电压工况为 7kV、8kV、9kV 和 10kV 四个梯度，电极间距固定为 10mm。为清晰捕捉试样破坏动态过程，高速摄像机帧率设定为 22,000fps（帧间隔 45 μ s）。为保证破岩过程中能稳定击穿液体介质形成等离子体通道，配置电导率^[28]为 5.55mS/cm 的淡盐水作为液体介质。试验步骤如下：首先控制针-针电极间距为 10mm，金属丝电爆炸试验需额外用直径 0.4mm 金属丝桥接电极；其次将电极置入试样钻孔，使用强力胶水固定电极上翼缘与试样表面（图 3）；接着连接电极至高压脉冲放电装置，同时将电流探头环绕正极缆线、高压探头并接入放电回路，并将两者接入示波器；随后以自来水配制电导率为 5.55 mS/cm 的淡盐水，经电极注水孔注入钻孔；安放试样并调试高速摄像系统后，分别设置 7kV、8kV、9kV 和 10kV 充电电压进行充放电操作；最终使用放电棒将高压电容器组残余电荷导入大地。为避免试验的偶然性误差，设置两组重复试验，确保试验结果误差处于可控区间。以金属丝电爆炸 9kV 重复试验结果为例，见表 2，各指标相对误差和变异系数都小于 5%，其他工况的误差水平均与此相当，可确保试验结果可靠性。

表 2 金属丝电爆炸 9kV 试验误差分析表

Table 2 Error analysis of 9 kV wire electrical explosion experiment

类别	峰值电压/kV	峰值电流/kA	沉积能量/kJ	裂纹密度/(cm/cm ²)	分形维数
试验 1	4.330	35.000	6.830	0.227	1.250
试验 2	4.140	33.800	6.520	0.217	1.231
相对误差 T_w	4.39%	3.43%	4.54%	4.41%	1.52%
变异系数 CV	3.17%	2.47%	3.28%	3.19%	1.08%

3 试验结果

3.1 破岩过程

如图 4 和图 5 所示，高速摄像机分别记录了典型工况下液相放电等离子体与金属丝电爆炸破岩过程。分析可知，孔内放电后，液体介质中均产生了高温高压等离子体。其中，纯液相放电等离子体由脉冲高压直接击穿液体介质形成，而金属丝桥接电极下的等离子体则主要源于金属丝在强电流作用下的瞬态相变。生成的高温高压等离子体迅速膨胀，以超音速压缩周围液体介质，激发出强烈的冲击波。该冲击波传播至钻孔壁时发生复杂的透射与反射作用，在固体试样内部诱发应力波。在钻孔近区，试样主要承受径向压应力和环向拉应力。由于岩石类材料通常具有较高的动态抗压强度但较低的抗拉强度，当环向拉应力超过其动态抗拉强度时，即引发径向开裂。

应力波向外传播并逐渐衰减。当传播至试样自由表面时，应力波反射形成拉伸波。在自由面附近区域，反射拉伸波可诱发反射拉裂纹。在向外传播的应力波与从自由面反射回来的拉伸波共同作用下，初始的径向裂纹与反射拉裂纹持续扩展、延伸并相互贯通，最终将试样切割成碎块。对比图 4 与图 5 在相同充电电压及相同时刻下的裂纹形态，可发现：金属丝电爆炸产生的径向裂纹长度大于液相放电等离子体破岩过程；此外，反射拉裂纹仅在金属丝电爆炸工况下被观察到。这表明，在输入相同初始电能的条件下，金属丝电爆炸在试样内部产生的应力波强度更大，其在自由面反射形成的拉伸应力也更强，因此具有更优的破岩效果。值得注意的是，尽管反射拉伸波强度较高，但仍不足以诱发自由面层裂现象。

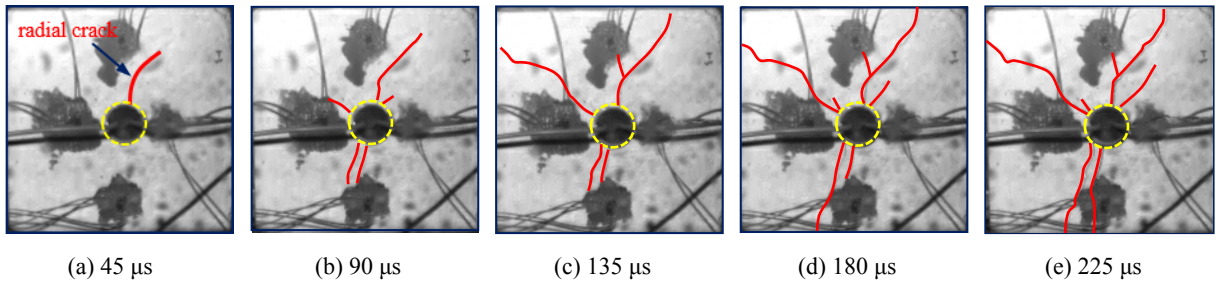


图 4 8kV 充电电压下液相放电等离子体破岩过程

Fig.4 Process of rock breaking by liquid-phase discharge plasma under 8kV charging voltage

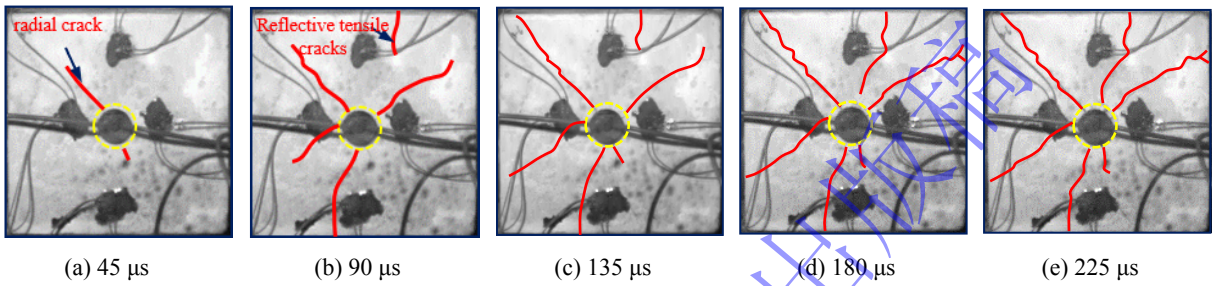


图 5 8kV 充电电压下金属丝电爆炸破岩过程

Fig.5 Process of rock breaking by wire explosion under 8kV charging voltage

3.2 开裂形态

试验后，经液相放电等离子体破岩或金属丝电爆炸破岩处理的试样均破碎成块。为分析二者裂纹形态差异，将碎块进行物理拼合，恢复试样宏观外形，并对比两种破岩模式下试样顶面（预设钻孔开口所在表面）的裂纹特征，如图 6 和图 7 所示。相同充电电压下，金属丝电爆炸破岩试样顶面的裂纹密度显著高于液相放电等离子体破岩。随着充电电压升高，液相放电等离子体破岩试样顶面的裂纹密度明显增加；而金属丝电爆炸破岩的裂纹密度则无明显变化。这是因为相同电压下金属丝电爆炸破岩的能量利用率更高，其传递至试样并用于破碎的能量在 7kV 时已接近试样承载极限。继续提高电压时，增量能量主要转化为碎块动能等非破碎能形式，而非进一步提升破碎效果。值得注意的是，两种破岩方式均产生由孔壁向四周辐射的裂纹，整体呈放射状分布，且孔壁均未出现明显粉碎区。

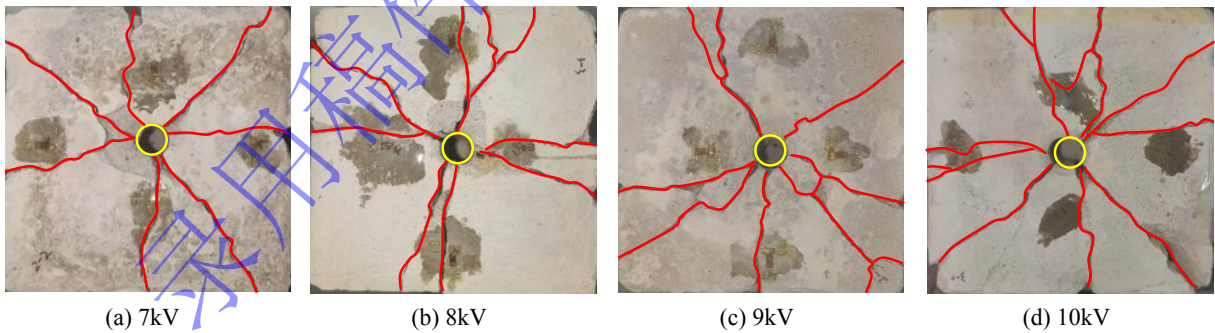


图 6 不同充电电压下液相放电等离子体破岩裂纹形态

Fig.6 Crack morphology of rock breaking by liquid-phase discharge plasma under different charging voltages

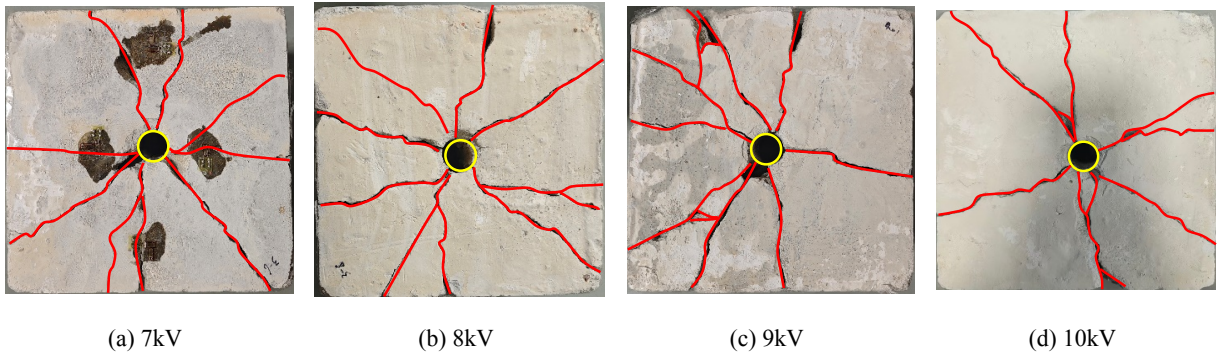


图7 不同充电电压下金属丝电爆炸破岩裂纹形态

Fig.7 Crack morphology of rock breaking by wire explosion under different charging voltages

本节通过统计钻孔表面裂纹长度并利用公式(2)计算裂纹密度以表征两种破岩模式下的裂纹密集程度。

$$C_d = \frac{\sum L}{A} \quad (2)$$

式中： C_d 为裂纹密度； L 为裂纹长度； A 为钻孔表面积。

先利用 imagej 软件将裂纹图像转换为灰度图像并进行二值化处理，然后利用公式(3)计算裂纹分形维数以定量表征两种破岩模式下的裂纹形态差异，计算结果如图8所示。

$$D = \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\lg N(\delta)}{\lg(1/\delta)} \quad (3)$$

式中： D 为裂纹的分形维数， $D=1.0$ 表示裂纹为简单直线， D 值越大，说明裂缝网络越复杂； δ 为划分网格的盒子边长； $N(\delta)$ 为覆盖裂纹区域所需盒子的数量。

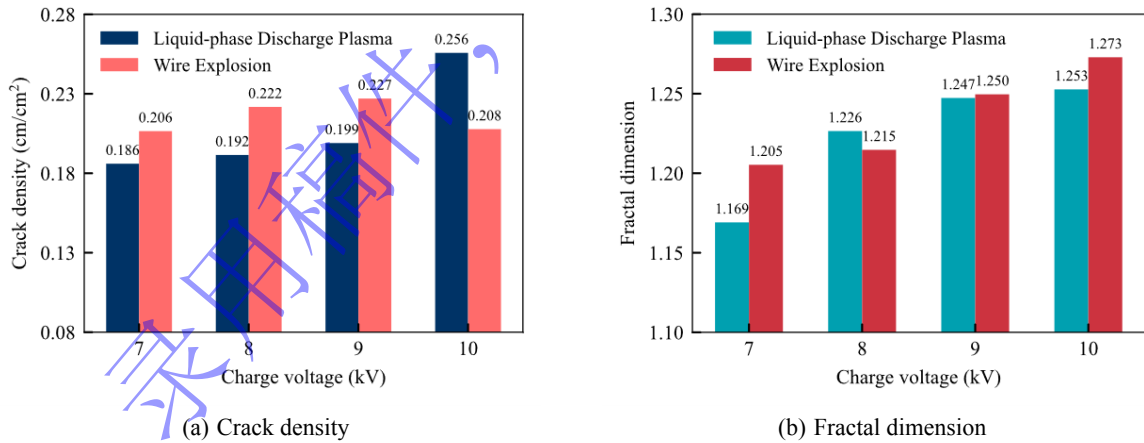


图8 液相放电等离子体与金属丝电爆炸破岩的裂纹形态定量分析

Fig.8 Quantitative analysis of crack morphology in rock breaking by liquid-phase discharge plasma and wire explosion

结果表明，随着充电电压从7 kV提升至10 kV，液相放电等离子体破岩下试样表面的裂纹密度由0.186 cm/cm²持续增大至0.256 cm/cm²；而金属丝电爆炸破岩的裂纹密度则由0.206 cm/cm²先增至9 kV时的0.227 cm/cm²，后略降至10 kV时的0.208 cm/cm²，呈现先增后减的特征。在分形维数方面，两种破岩模式下的裂纹分形维数均随充电电压升高而单调递增，其中液相放电等离子体破岩的分形维数由1.169增至1.253，金属丝电爆炸破岩的分形维数则由1.205增至1.273。由图4、图5裂纹开裂过程可以看到，在相同初始电能的条件下，金属丝电爆炸能诱发更显著的反射拉裂纹生成，反射拉裂

纹与径向开裂裂纹构成复杂的裂纹网络。所以在相同电能驱动下，金属丝电爆炸的分形维数水平较液相放电更高。

3.3 破碎特征

破碎块体尺寸是评估破岩效果的关键指标。如图9所示，7~9 kV 电压区间内，金属丝电爆炸破岩的碎块更细小，中、小碎块占比更高，大块占比更低；液相放电等离子体破岩则以粗大碎块为主，小碎块生成有限。电压升至 10 kV 时，破碎效果显著反转：液相放电等离子体破岩细粒化程度急剧增强，大量细小碎屑生成，大块近乎完全破碎，细碎效果显著优于金属丝电爆炸破岩；而后者仍以大块为主，细碎化提升微弱。

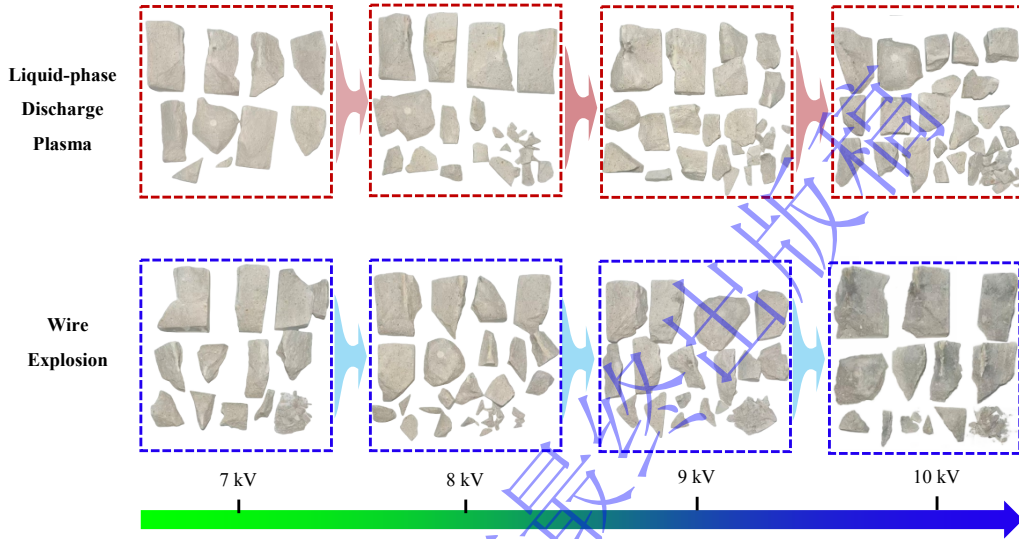
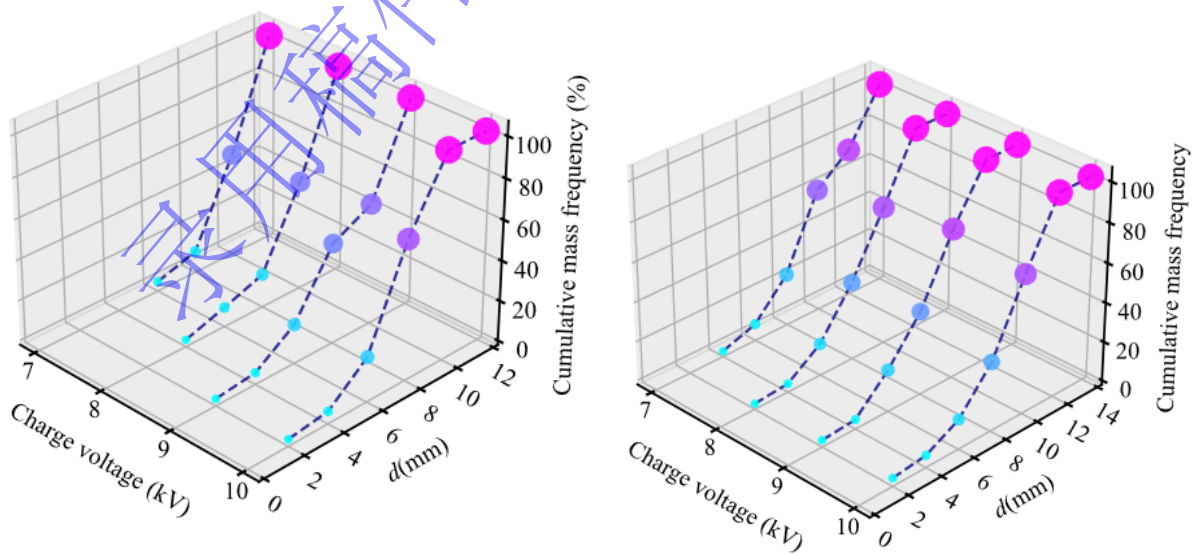


图9 两种破岩作用下试样破碎形态对比

Fig.9 Comparison of specimen crushing morphologies under two types of rock-breaking actions

图10的累积质量分数曲线进一步验证了上述规律：7~9 kV 时，金属丝电爆炸破岩曲线上升更快，表明小粒径碎块质量占比更高；液相放电等离子体破岩曲线平缓，体现其粗碎为主的破碎特征。10 kV 下，液相放电等离子体破岩曲线急剧向小粒径偏移，直观反映细碎化爆发式增强；而金属丝电爆炸破岩曲线变化平缓，大粒径碎块仍占主导。



(a) Liquid-phase discharge plasma rock breaking

(b) Wire explosion rock breaking

图 10 两种破岩模式下碎块分布

Fig.10 Distribution of fragments under two rock-breaking modes

采用标准筛对破碎后试样进行分级筛分，获取各粒径区间碎块的质量，然后取各粒径区间平均值作为该区间代表性粒径，最后利用公式（4）计算平均粒径，计算结果见图 11(a)。

$$\bar{d} = \Sigma(m_i d_i) / \Sigma m_i \quad (4)$$

式中： \bar{d} 为平均粒径； m_i 为各粒径区间质量； d_i 为各粒径区间代表性粒径。

对碎块以粒径大小 10mm 为尺度界限分级测量的方法统计新增表面积。对于粒径小于或等于 10mm 的小碎块，基于其质量与密度，按等质量球体模型计算表面积。粒径大于 10mm 的碎块则利用平面纸张紧密包覆表面并展开摊平拍摄图片，然后通过图像识别统计各纸张总面积以获取碎块表面积大小。最后累积所有碎块总面积后，减去试样初始表面积即得到新增表面积，计算结果见图 11(b)。

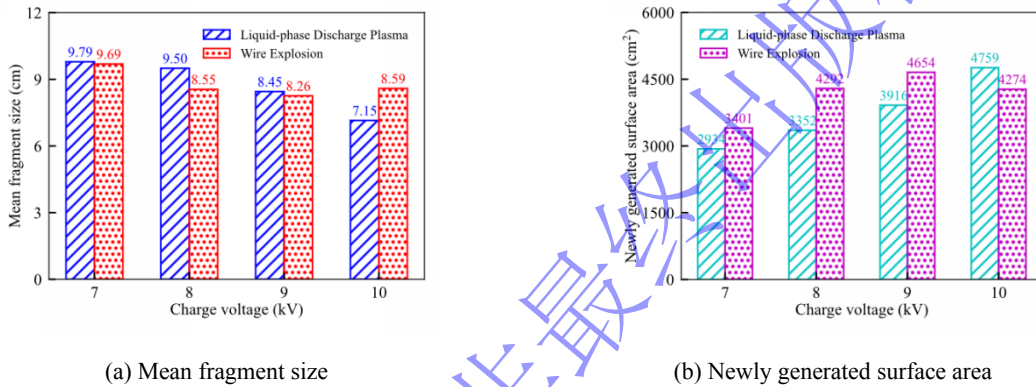


图 11 两种破岩模式下碎块尺寸特征

Fig.11 Characteristics of fragment size under two rock-breaking modes

图 11 的平均块度与新增表面积数据进一步量化验证了两种破岩模式的细碎化规律。在 7~9 kV 电压区间，金属丝电爆炸破岩的平均块度更小、新增表面积更大，体现出更优的细碎化效果；而液相放电等离子体破岩平均块度更大、新增表面积更小，以粗碎为主。当电压升至 10 kV 时，规律发生反转：液相放电等离子体破岩平均块度骤降至 7.15 cm，新增表面积跃升至 4759 cm²，细碎化程度爆发式增强，显著优于金属丝电爆炸破岩；后者平均块度与新增表面积变化平缓，仍以粗碎为主。这一量化结果与实物破碎图、累积质量频率曲线完全吻合，共同证实了金属丝电爆炸破岩在低电压下细碎化占优、液相放电等离子体破岩在高电压下实现高效细碎化的规律。

3.4 能量耗散

根据放电电流与电压时程曲线可计算等离子体通道的沉积能量，即注入钻孔内的能量。图 12-13 分别给出的等离子体破岩与金属丝电爆炸破岩放电电压与电流时程曲线显示，两种破岩模式下均没有明显的预击穿阶段，且放电电流峰值接近。然而，关键区别在于初始电压：等离子体破岩的初始电压等于充电电压，而金属丝电爆炸破岩的初始电压则显著小于充电电压。这一差异源于两者不同的能量注入机制。在等离子体破岩中，高电压首先施加在电极两端，随后击穿其间的液相介质形成导电通路，因此初始放电电压必然等于充电电压。而在金属丝电爆炸破岩中，金属丝本身在放电前已构成电极间的短路状态，一旦放电开始，瞬间注入的电能量主要被金属丝和回路固有电阻组成的串联电路所分压，金属丝分得的初始电压自然远低于充电电压。

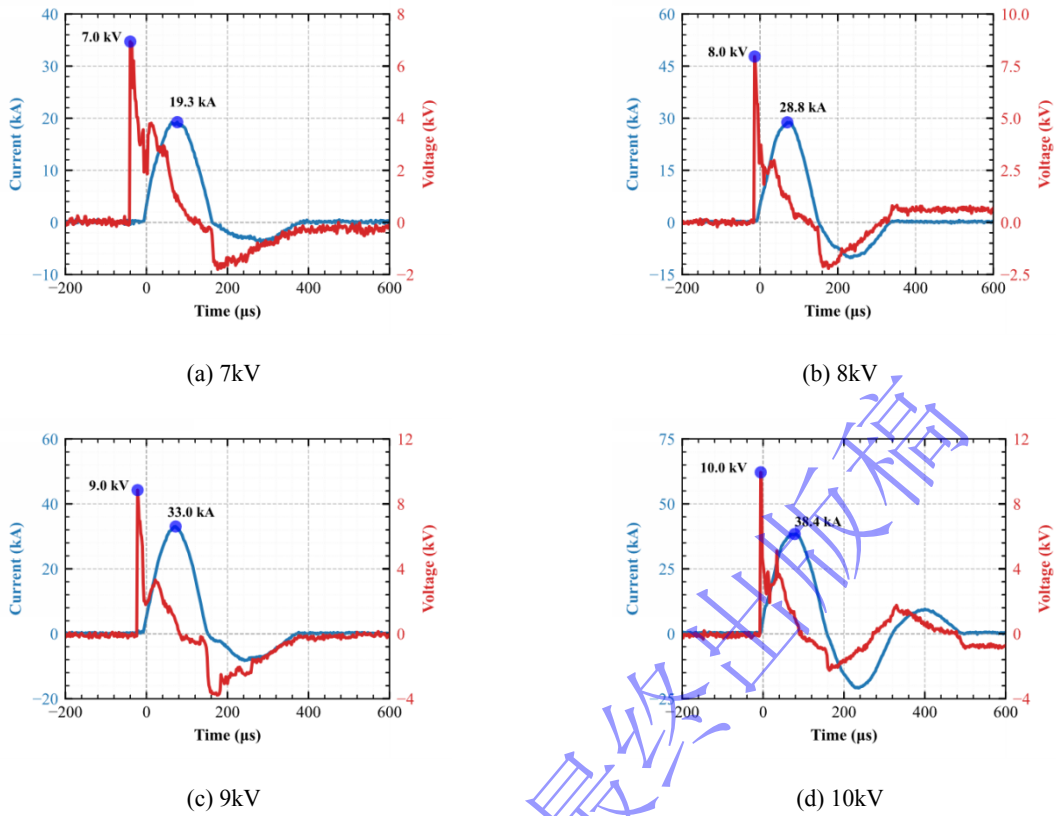


图 12 液相放电等离子体破岩放电电压与电流时程

Fig.12 Time history of discharge voltage and current in rock breaking by liquid-phase discharge plasma

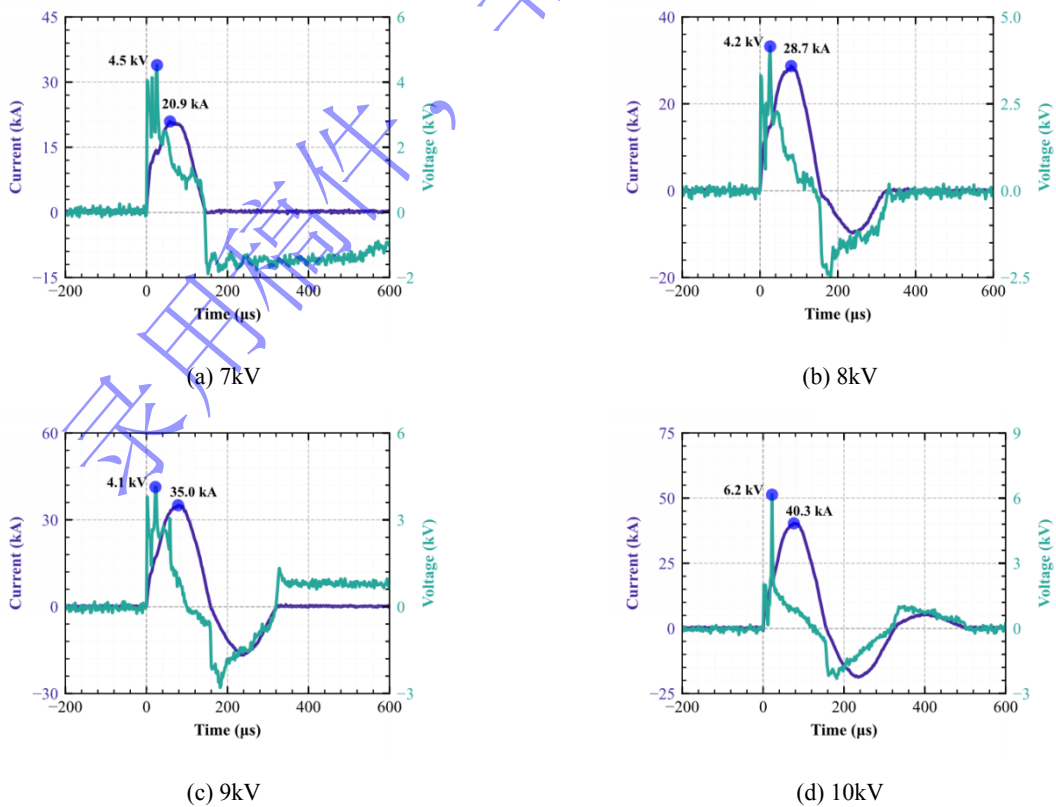


图 13 金属丝电爆炸破岩放电电压与电流时程

Fig.13 Time history of discharge voltage and current in rock breaking by wire explosion

液相放电等离子体破岩的能量传输过程包括电容储能经过回路损耗和消耗能量击穿液体介质后转化为等离子体通道沉积能量，然后沉积能量转换为冲击波机械能，最后冲击波机械能经过传递介质耗散转化为作用于岩石破碎的破碎能。而金属丝电爆炸的能量传递过程与之不同的是电容储能在转化为通道沉积能量时不需要击穿液体介质而是损耗能量用于金属丝相变。两种破岩模式的能量分配不同主要在于沉积能量的转化差异。通过放电电压与电流时程曲线结合公式(5)获得两种破岩模式注入孔内的能量 E_{pl} 。结果表明，液相放电等离子体破岩能量随充电电压升高持续增长，而金属丝电爆炸破岩能量呈先增后降趋势。

表3 两种破岩模式下孔内注入能量 (单位: kJ)

Table3 Energy injected into the hole under two rock-breaking modes (Unit: kJ)

破岩模式	充电电压/kV			
	7	8	9	10
液相放电等离子体破岩	3.39	4.96	6.31	8.68
金属丝电爆炸破岩	3.66	5.42	6.83	6.62

基于电容储能公式(6)可以计算得到能量沉积效率 η ，见公式(7)。

$$E_{pl} = \int_t U(t) \times I(t) dt \quad (5)$$

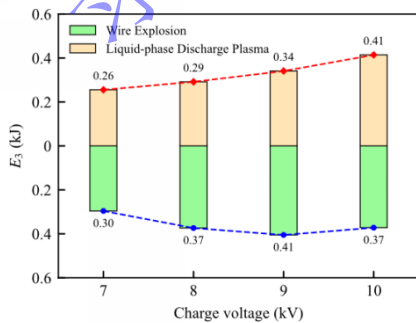
$$E = \frac{1}{2} CU^2 \quad (6)$$

$$\eta = \frac{E_{pl}}{E} \quad (7)$$

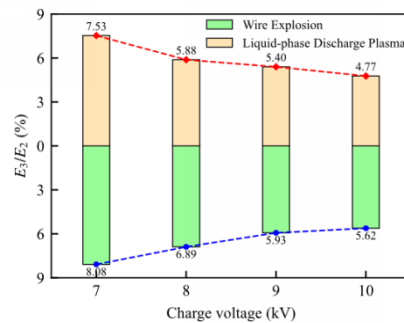
式中： $U(t)$ 和 $I(t)$ 分别为放电过程负载电极两端电压与电流时程； C 为电容值，本研究中 C 为 $250\mu\text{F}$ ； U 为充电电压。

等离子体破岩能量沉积效率从7kV的55.37%单调上升至10kV的69.43%，而金属丝电爆炸效率在7-9kV由59.78%升至67.47%后，于10kV降至52.96%。结合前述二者在放电参数上的对比分析可知，这种差异源于本质机制不同，等离子体破岩通过高电压击穿液相介质实现更高效的能量传递；金属丝电爆炸破岩则在10kV临界电压下因电流密度剧增引发金属丝极端快速汽化，导致大量能量消耗于材料相变内能，同时过早形成的等离子体通道因电阻激增触发电流截断效应阻碍能量释放，加之剧增的回路损耗和强辐射损失，最终造成高压下能量沉积效率的下降。

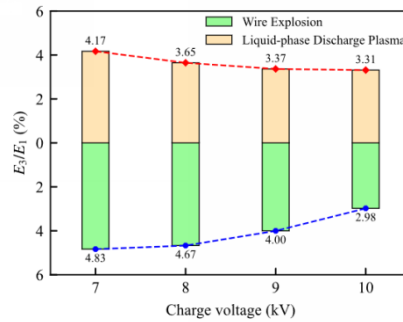
两种破岩模式均通过电容器储能注入孔内，电能先转化为等离子体通道沉积能，再进一步分配为岩石破碎能，利用公式(1)和断裂比能以及新增表面积数据可以算得破碎能大小，见图14。



(a) Fragmentation energy



(b) Fragmentation energy ratio in deposited energy



(c) Fragmentation energy ratio in capacitive stored energy

图 14 两种破岩模式下破碎能对比

Fig.14 Comparison of fragmentation energy under two rock-breaking modes

由图 14 能量特征可知，液相放电等离子体破岩的破碎能随电压升高持续增大，而金属丝电爆炸破岩的破碎能呈先增后减趋势，这一差异主要由沉积能主导。金属丝电爆炸的沉积能在电压为 10 kV 时出现下降，直接导致分配给岩石的破碎能同步减小。二者破碎能在沉积能及电容储能中的占比均随电压升高而降低。此外，金属丝电爆炸破岩的破碎能在沉积能中的占比略高于液相放电等离子体破岩，电压由 7 kV 升至 10 kV 时，前者破碎能占沉积能比例从 8.08% 降至 5.62%、占电容储能从 4.83% 降至 2.98%；后者则分别从 7.53% 降至 4.77%、占电容储能从 4.17% 降至 3.31%，该结果表明金属丝电爆炸在沉积能向破碎能的转化环节效率更优，但受高电压下非破碎能量损耗（如金属丝快速汽化、电流截断损耗等）加剧的影响，其破碎能占比仍随电压升高持续降低。值得注意的是，10 kV 充电电压下金属丝电爆炸破岩的能量利用率低于液相放电等离子体破岩，根本原因在于其沉积能量不足，而非破碎能转化效率的劣势。这一沉积能量差异，是导致两种模式破岩效果随充电电压变化呈现显著分化的直接原因。

4 结论

本文通过系统的室内试验，研究了 7~10 kV 充电电压下液相放电等离子体与金属丝电爆炸破岩特征的差异，得到如下主要结论：

(1) 液相放电等离子体破岩的表面裂纹密度、新增表面积随电压升高单调递增，平均块度单调递减；而金属丝电爆炸破岩的表面裂纹密度与新增表面积呈先增后减趋势，平均块度则呈先减后增特征。两种破岩模式下试样表面裂纹分形维数均随电压升高而增大，且金属丝电爆炸的裂纹网络更复杂。

(2) 随充电电压升高，液相放电等离子体破岩的能量沉积效率从 7 kV 的 55.37% 单调上升至 10 kV 的 69.43%；而金属丝电爆炸破岩的沉积效率呈先增后减趋势，从 7 kV 的 59.78% 升至 9 kV 的 67.47% 后，于 10 kV 降至 52.96%。10 kV 电压下，金属丝电爆炸破岩因电流密度剧增引发极端汽化（消耗大量相变能）及过早等离子体电阻激增触发电流截断，加之强损耗，所以导致能量沉积效率下降。

(3) 充电电压由 7 kV 升至 10 kV 时，液相放电等离子体破岩破碎能占沉积能比例从 7.53% 降至 4.77%（占电容储能 4.17%→3.32%），而金属丝电爆炸破岩中其从 8.08% 降至 6.62%（占电容储能 4.83%→2.98%）。这表明金属丝电爆炸破岩的沉积能向破碎能转化效率更高。

本文主要对比分析了液相放电等离子体与金属丝电爆炸破碎软岩方面的差异，后续将深入研究不同岩体类型下二者破岩特征差异，以期期为工程应用提供更全面指导。

参考文献

- [1] 聂百胜, 马正韬, 柳先锋, 等. 基于液电效应的高强电爆震致裂页岩试验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2024, 53(04): 623-633. DOI: 10.13247/j.cnki.jcmt.20240044.
NIE B S, MA Z T, LIU X F, et al. Hydro-electric effect based experimental study on shale cracking caused by high-strength electric detonation [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2024, 53(4): 623-633. DOI: 10.13247/j.cnki.jcmt.20240044.
- [2] PENG J Y, ZHANG F P, YAN G L, et al. Experimental study on rock-like materials fragmentation by electric explosion method under high stress condition [J]. Powder Technology, 2019, 356: 750-758. DOI: 10.1016/j.powtec.2019.09.001.
- [3] CHE L, GU X H, Li H D. Numerical analysis and experimental research on hard rock fragmentation by high voltage pulse discharge[J]. Minerals Engineering, 2021, 168: 106942. DOI: 10.1016/j.mineng.2021.106942.
- [4] 李雪, 王传兵, 王雁冰, 等. 多炮孔岩体等离子体爆破定向致裂机理研究[J]. 工程科学学报, 2025, 47(02): 259-270. DOI: 10.13374/j.issn2095-9389.2024.04.01.001.
LI X, WANG C B, WANG Y B, et al. Research on the directional fracturing mechanism of multiborehole rock mass plasma blasting [J]. Chinese Journal of Engineering, 2025, 47(02): 259-270. DOI:10.13374/j.issn2095-9389.2024.04.01.001.
- [5] 徐尤来, 刘毅, 黄仕杰, 等. 脉冲电爆炸协同破岩技术研究[J]. 强激光与粒子束, 2025, 37(05): 98-107. DOI: 10.11884/HPLPB202537.240350.
XU Y L, LIU Y, HUANG S J, et al. Research on pulse electric explosion synergistic rock breaking technology [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2025, 37(05): 98-107. DOI: 10.11884/hplpb202537.240350.
- [6] 李沼萱. 脉冲等离子压裂岩石起裂机理研究[D]. 大庆: 东北石油大学, 2020. DOI: 10.26995/d.cnki.gdqsc.2020.000929.
- [7] 韩若愚, 李柳霞, 钱盾, 等. 液体中金属丝电爆炸的研究现状与展望[J]. 高电压技术, 2021, 47(03): 766-777. DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20210166.
HAN R Y, LI L X, QIAN D, et al. Exploding Metal Wires in Liquids: Current Situation and Prospects [J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(03): 766-777. DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20210166.
- [8] NATALIA K, DMITRII Z, VLADIMIR G. Plasma blasting of rocks and rocks-like materials: an analytical model[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2022, 150: 104986. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2021.104986.
- [9] YE Z W, CHEN M. Characteristics of peak load on a borehole wall in water-coupling blasting[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2023, 149(1): 04022087. DOI: 10.1061/jenmdt.emeng-6610.
- [10] 熊亮雳. 液电激波激发砂岩破裂规律研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2022. DOI: 10.27157/d.cnki.ghzku.2022.002646.
- [11] Ma G W, An X M. Numerical simulation of blasting-induced rock fractures [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2008, 45(6): 966-975. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2007.12.002
- [12] GONG F Q, SI X F, LI X B, et al. Dynamic triaxial compression tests on sandstone at high strain rates and low confining pressures with split Hopkinson pressure bar [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2019; 113: 211-219. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2018.12.005.
- [13] OZGUR Y, TUGRUL U. Three dimensional numerical rock damage analysis under blasting load [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2013, 38: 266-278. DOI: 10.1016/j.tust.2013.07.007.
- [14] 魏东, 陈明, 叶志伟, 等. 基于应变率相关动力特性的岩体爆破破坏区范围研究[J]. 工程科学与技术, 2021, 53(01): 67-74. DOI: 10.15961/j.jsuese.201900872.
WEI D, CHEN M, YE Z W, et al. Study on Blasting Failure Zone Based on Rate-dependent Dynamic Characteristics of Rock Mass [J]. Advanced Engineering Sciences, 2021, 53(01): 67-74. DOI: 10.15961/j.jsuese.201900872.
- [15] 余庆, 张辉, 刘科柔, 等. 液电脉冲致裂试验与影响因素模拟分析[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2025, 49(05):110-118. DOI: 10.3969/j.issn.1673-5005.2025.05.010.
YU Q, ZHANG H, LIU K R, et al. Electro-hydraulic fracturing experiments and numerical analysis of factors affecting crack formation [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2025,49(05):110-118. DOI:10.

3969 / j. issn. 1673-5005. 2025. 05. 010.

- [16] SANG H C, SANG S C, MITSUHIRO Y, et al. The dynamic fracture process in rocks under high-voltage pulse fragmentation [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2016, 49(10): 3841-3853. DOI:10.1007/s00603-016-1031-z.
- [17] LIU W J, ZHOU X, ZHANG Z M, et al. Investigation on the rock-breaking process of hydraulic-electric pulsed plasma discharge [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2025, 25: 3719-3739. DOI: 10.1007/s00603-024-04329-z.
- [18] LIU W J, ZHOU X, ZHANG Z M, et al. Experimental and numerical simulation research on shock wave rock-breaking by high voltage electric pulse [J]. *Physica scripta*, 2024, 99(7): 075614. DOI: 10.1088/1402-4896/AD5794.
- [19] 鲍先凯, 乔建龙, 崔广芹, 等. 组合电压水中放电致裂煤岩体损伤及裂纹扩展演化规律[J]. *煤炭科学技术*, 2025, 53(03): 248-263. DOI: 10.12438/cst.2024-1406.
- BAO X K, QIAO J L, CUI G Q, et al. Damage and crack propagation evolution of coal rock under combined voltage discharge in water [J]. *Coal Science and Technology*, 2025, 53(03):248-263. DOI: 10.12438/cst.2024-1406.
- [20] 鲍先凯, 刘源, 郭军宇, 等. 煤岩体在水中高压放电下致裂效果的定量评价[J]. *岩石力学与工程学报*, 2020, 39(04): 715-725. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2019.0692.
- BAO X K, LIU Y, GUO J Y, et al. Quantitative evaluation of fracturing effect of coal-rock masses under high-voltage discharge actions in water [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2020, 39(04): 715-725. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2019.0692.
- [21] 付荣耀, 孙鹤鸿, 徐旭哲, 等. 静水压力对岩石在等离子体冲击下压裂效果的影响[J]. *爆炸与冲击*, 2018, 38(05): 1051-1056. DOI: 10.11883 / bzycj-2017-0057.
- FU R Y, SUN Y H , XU X Z, et al. Effect of hydrostatic pressure on fracture of rock subjected to plasma impact [J]. *Explosion And Shock Waves*, 2018, 38(05): 1051-1056. DOI: 10.11883 / bzycj-2017-0057.
- [22] 王雁冰, 李雪, 王兆阳, 等. 围压作用下等离子体的爆破破岩效应[J]. *爆炸与冲击*, 2025, 45(04): 136-152. DOI: 10.11883/bzycj-2024-0089.
- WANG Y B, LI X, WANG Z Y, et al. Rock breaking effect of plasma blasting under confining pressure [J]. *Explosion And Shock Waves*, 2025, 45(04): 136-152. DOI: 10.11883/bzycj-2024-0089.
- [23] 鲍先凯, 张童, 崔广芹, 等. 水中高压电脉冲压裂煤岩体裂纹断裂演化特征[J]. *煤炭科学技术*, 2025, 53(04): 324-337. DOI: 10.12438/cst.2023-1815.
- BAO X K, ZHANG T, CUI G Q, et al. Fracture evolution characteristics of coal rock mass by high-voltage electric pulse fracturing in water [J]. *Coal Science and Technology*, 2025, 53(04):324-337. DOI: 10.12438/cst.2023-1815.
- [24] PENG J Y, ZHANG F P, YANG X H. Dynamic fracture and fragmentation of rock-like materials under column charge blasting using electrical explosion of wires [J]. *Powder Technology*, 2020, 367:517-526. DOI: 10.1016/j.powtec.2020.04.012.
- [25] MENG B, CAO Y, ZHANG X, et al. Pulse Wave and Rock Fracturing Characteristics of Composite Energetic Materials Ignited by Underwater Wire Electrical Explosion [J]. *ACS omega*, 2025, 10(19):19350-19360. DOI: 10.1021/ACSOMEGA.4C09898.
- [26] 韩忠星. 面向井下金属丝电爆炸装置设计的参数匹配及其爆炸冲击研究[D]. 北京: 中国石油大学, 2024. DOI: 10.27643/d.cnki.gsybu.2024.000094.
- [27] LI M, YU H, ZHANG J Z, et al. Study on dynamic mechanical response characteristics and fracture energy dissipation mechanism of sandstones with different saturations under real-time low temperature [J]. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, 2023, 9(1). DOI:10.1007/S40948-023-00622-3.
- [28] Zhu X, Liu S, Liu W, et al. Growth mechanism of high-voltage electric pulse rock breaking 3D plasma channel in drilling fluid environment[J]. *Contributions to Plasma Physics*, 2024, 64(10): e202400035-e202400035. DOI:10.1002/CTPP.202400035.