

液电脉冲激波特性分析*

吴敏干¹, 刘毅², 林福昌², 刘思维², 孙建军¹

(1. 武汉大学电气与自动化学院, 武汉 430072; 2. 华中科技大学电气与电子工程学院 强电磁工程与新技术国家重点实验室, 武汉 430074)

摘 要: 基于相应的数学模型来表征液电脉冲激波的产生和传播过程, 搭建了液电式碎岩综合试验平台, 分析了典型的激波特性的仿真和实测结果。给出了不同充电电压下液电脉冲激波特性的仿真结果, 并分析了充电电压对激波特性的影响。结果表明: 充电电压为 11 kV 时, 激波的压力峰值为 2.67 MPa, 激波能量为 27.30 J, 波前时间为 2.16 μs , 激波加载速率为 1.24 MPa/ μs , 电能转化为激波能量的效率为 13.35%; 提高电容充电电压, 激波压力峰值和激波能量增大, 波前时间减少, 激波加载速率增加, 但电能转化为激波能量的效率降低。利用建模分析的方法, 可以根据放电回路参数预测液电脉冲激波特性, 从而为进一步研究激波破碎岩石的形态和效果提供理论依据。

关键词: 液电式破碎; 激波特性; 等离子体通道; 波前时间; 加载速率; 能量利用效率

中图分类号: TM8

文献标志码: A doi: 10.11884/HPLPB202032.190356

Characteristics analysis of electrohydraulic shockwave

Wu Min'gan¹, Liu Yi², Lin Fuchang², Liu Siwei², Sun Jianjun¹

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic and Technology, School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Characteristics of electrohydraulic shockwave are the keys to the application of electrohydraulic disintegration of rocks (EHDR). Mathematical models are used to characterize the generation and propagation of the shockwave, an integrated experimental platform is established, the measured and simulated results of typical shockwave characteristics are analyzed. The simulated results of characteristics of shockwaves under different charge voltage are given, and the influence of charge voltage on the shockwave characteristics are analyzed. The results show that the peak pressure and energy of shockwave is 2.67 MPa and 27.30 J respectively, the wave front time is 2.16 μs , the loading rate is 1.24 MPa/ μs , when the charge voltage is 11 kV. The peak value and energy of shockwaves increase, the wave front time decreases, the loading rate of shockwaves increases, while the efficiency of electrical energy transfer into shockwave energy decreases, when the charge voltage of capacitor rises. Characteristics of shockwaves can be predicted from the parameters of discharge circuit via simulation, thus to provide theoretical basis for further study on the morphology and effect of EHDR.

Key words: electrohydraulic disintegration of rocks (EHDR); shockwave characteristics; plasma channel; wavefront time; loading rate; energy utilization efficiency

基于水中高压脉冲放电破碎岩石的新技术已经被广泛应用于开采海底富钴结壳、开采页岩气、金属矿石预富集和等离子体钻井等领域^[1-4]。相比于包括水射流碎岩、机械碎岩和激光碎岩等在内的传统的岩石破碎技术, 水中高压脉冲放电破碎岩石新技术具有效率高、环境友好和选择性好等优点^[3-4]。液电式碎岩 (EHDR) 作为水中高压脉冲放电破碎岩石形式的一种, 是利用水中高压脉冲放电的液电效应辐射出强烈激波, 冲击作用于目标岩石产生致裂破碎效果。

液电脉冲激波是液电式碎岩装置研发和实际工程应用中的关键因数, 激波的峰值压力、波前时间、加载速率和机械能量等特性会影响激波在不同介质中传播的衰减特性, 以及传播衰减后的激波对目标岩石致裂破碎的形态

* 收稿日期: 2019-09-16; 修订日期: 2019-12-04

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51877095)

作者简介: 吴敏干 (1994—), 男, 硕士, 从事水中高压脉冲放电机理和应用研究; wumingan@whu.edu.cn.

通信作者: 刘毅 (1985—), 男, 博士, 副教授, 从事脉冲功率技术及高电压与绝缘技术研究; yiliu@hust.edu.cn.

和效果。液电式碎岩过程复杂,水间隙被高压脉冲击穿后产生液电脉冲激波,激波在水介质中向前传播,通过液-岩界面经复杂的折、反射后进入岩石中,在岩石介质内的各界面产生强剪切力,激波的峰值压力大于岩石的断裂强度可使岩石产生一定的裂缝^[5]。在实际应用中,还常利用重复频率加载激波的方式,使裂缝不断扩展、延伸和沟通,累积疲劳效应以改变岩石的物性,最终导致岩石解体破碎^[5-6]。液电式碎岩过程涉及到电气、等离子体、流体力学和岩石力学等多个环节,受到电气参数、电极形式、液体电介质和目标岩石物性等多个因素的影响。试验参数配置和目标岩石物性的不同,会导致液电脉冲激波特性和岩石破碎的效果和形态的差异。关于液电式碎岩的研究主要集中在破碎效果和作用规律,缺少针对液电脉冲激波特性的理论分析。利用相应的数学模型来表征高压脉冲击穿水介质过程、等离子体通道的膨胀过程和液电脉冲激波在水介质中的传播过程,可得到液电脉冲激波的理论特性,进而可以研究不同特性的液电脉冲激波破碎目标岩石的形态和效果。

针对液电式碎岩过程中液电脉冲激波特性,本文利用相应的数学模型,建立放电回路参数和液电脉冲激波之间的联系;搭建了液电式碎岩综合试验平台,给出典型的激波特性的实测和仿真结果;分析了等离子体通道电阻的时变特性及其对通道沉积能量的影响;研究了电容充电电压对激波压力峰值、激波波前时间、激波加载速率、激波能量和电能转化为激波能量效率等特性的影响。

1 液电式碎岩综合试验平台

搭建的液电式碎岩综合试验平台示意图如图1所示,平台包括充电储能系统、液电脉冲激波破碎岩石系统和测量系统。充电储能系统中:充电机的额定电压为50 kV,主充电电容 C 为3.38 μF ,额定电压为50 kV。采用触发真空开关(TVS)作为放电开关,其额定电压为30 kV。液电脉冲激波破碎岩石系统中:液体介质采用普通自来水,电导率约为35 mS/m;电极采用不锈钢材质的针-板形式,针电极的尖端直径为1 mm,板电极的直径为25 mm,电极间隙为10 mm;激波碎岩容器为尺寸1 m \times 1 m \times 1 m的立方体水箱,水箱壁上开有25 cm直径的观察窗。通过间隙短接放电试验测得回路总电感 L 为3.34 μH ,外回路电阻 R_1 为0.15 Ω 。测量系统中:分别使用Tektronix高压探头(型号:P6015A)和Pearson电流探头(型号:Pearson1330)测量间隙两端的电压波形和放电电流波形;采用压力探头(型号:PCB138A05)测量液电脉冲激波压力波形,置于间隙中心水平距离17 cm处;利用示波器(型号:Tektronix MSO54)同步记录放电过程的电压、电流和激波信号;利用高速摄像机(型号:Photron FASTCAM SA-Z)拍摄放电等离子体通道演化过程的光学图像,相机拍摄速度为1.88 $\mu\text{s}/\text{帧}$,曝光时间设定为1.3 μs 。

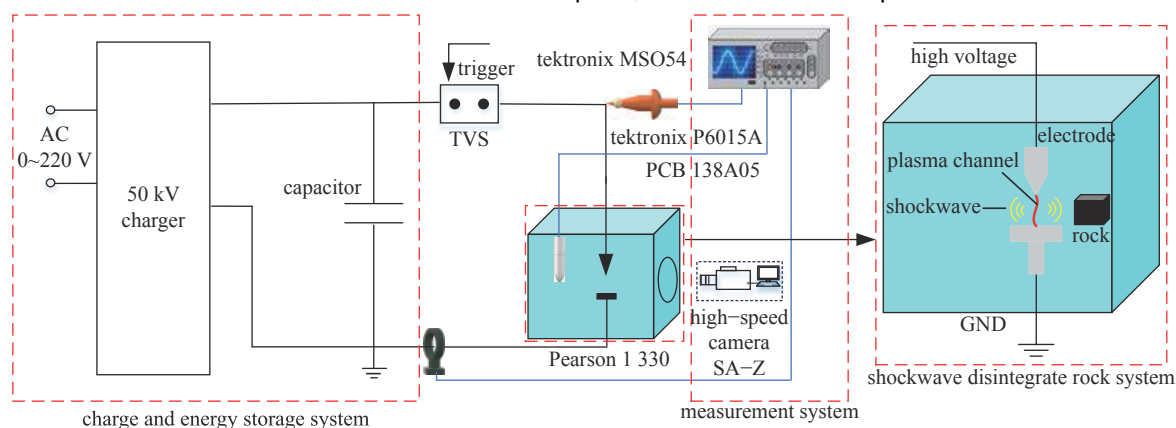


Fig. 1 Schematic of experimental platform for electrohydraulic disintegration of rocks (EHDR)

图1 液电式碎岩试验平台示意图

2 液电脉冲激波特性理论分析

2.1 液电脉冲激波的形成和传播过程

高压脉冲放电击穿水介质过程中能够辐射出强烈的液电脉冲激波,激波在水介质中传播经液-岩界面进入岩石,使岩石致裂破碎,是一个瞬时、连续且复杂的能量转换过程。电容充电电压到达预设值时,通过控制开关导通,电容电压迅速施加到间隙两端,电容的初始储能 $E_C = CU_0^2/2$,其中 U_0 为电容初始电压。水中高压脉冲放电过程包含预击穿阶段和主放电阶段。预击穿阶段水间隙流过泄漏电流,电容上存在一定的电压降落。主放电阶段,施加在电极上的高电压击穿水间隙,电极间建立起放电等离子体通道,电容上剩余的能量迅速注入到等离子体通道中,转换为通道的沉积能量。注入等离子体通道的能量不断释放焦耳热,使通道快速径向膨胀并汽化周围的水

介质形成空腔, 辐射出强烈的液电脉冲激波, 同时还伴随着光、声辐射等现象, 放电等离子通道的沉积能量转换为通道的内能、激波的机械能和辐射能量等。由于在液电效应辐射激波过程中, 光、声辐射能量占等离子体通道沉积能量的比例很小^[7-8], 因此在分析的过程中可忽略光、声辐射能量的影响, 等离子体通道的能量平衡表达式可以表示为

$$E_{\text{ch}} = E_{\text{in}} + E_{\text{sw}} \quad (1)$$

式中: E_{ch} 为等离子体通道的沉积能量。在理想气体状态下, 放电等离子体通道的内能 E_{in} 、激波能量 E_{sw} 和通道沉积能量 E_{ch} 可以表示为^[9]

$$\begin{cases} E_{\text{in}} = \frac{P_{\text{ch}}(t)V(t)}{\gamma - 1} \\ E_{\text{sw}} = \int P_{\text{ch}}(t)dV(t) \\ E_{\text{ch}} = \int_0^{\tau} i^2(t)R_{\text{ch}}(t)dt \end{cases} \quad (2)$$

式中: $P_{\text{ch}}(t)$ 是等离子体通道内部压力; $V(t)$ 是放电等离子体通道的体积; γ 是绝热系数, 取值为 1.3; $i(t)$ 为主放电电流; $R_{\text{ch}}(t)$ 为通道时变电阻; τ 为主放电过程持续的时间。由式 (1) 和 (2) 可以得到

$$\frac{dE_{\text{ch}}(t)}{dt} = P_{\text{ch}}(t)dV(t) + \frac{1}{\gamma - 1} \frac{d[P_{\text{ch}}(t)V(t)]}{dt} \quad (3)$$

利用高速相机拍摄的放电等离子体通道形成初期的光学图像如图 2(a) 所示, 通道直径远小于其长度, 等离子体通道近似圆柱形径向膨胀。放电等离子体通道的圆柱形膨胀模型如图 2(b) 所示, 等离子体通道体积 $V(t) = \pi r^2 l$, r 是等离子体通道的半径, l 是放电等离子体通道的长度。通道内部压力与通道膨胀速度之间的关系可以表示为^[10]

$$\frac{dr}{dt} = \frac{(P_{\text{ch}} + \beta)^{3/7} - \beta^{3/7}}{\sqrt{9\rho_0}} \quad (4)$$

式中: 初始值 $r(0)$ 取 0.2 mm; α, β 为常数, $\alpha = 300.1$ MPa, $\beta = 300$ MPa; ρ_0 为液体密度, 本文液体是水, $\rho_0 = 1\,000$ kg/m³。

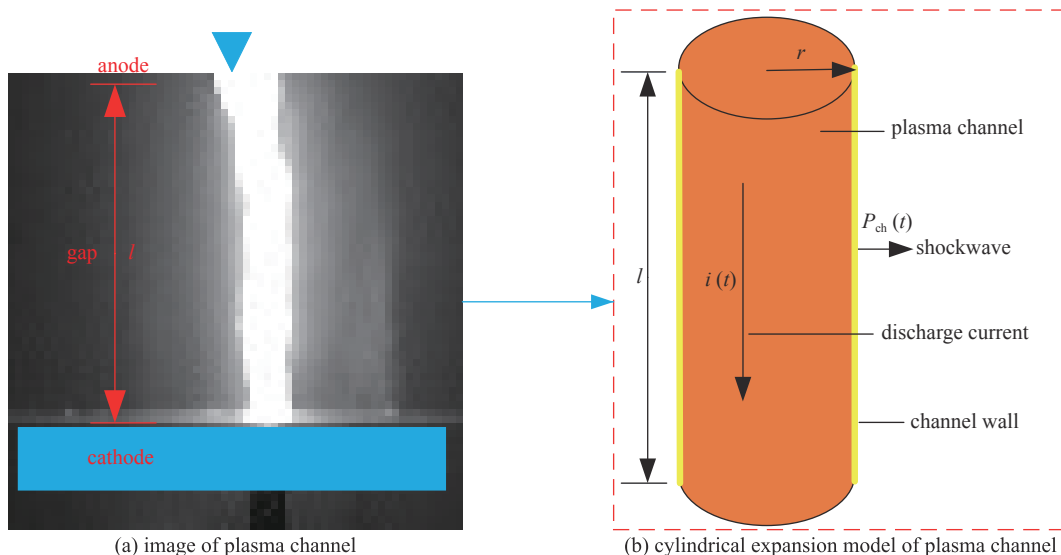


Fig. 2 Image of the discharge plasma channel captured by high speed camera and the schematic of cylindrical expansion model

图 2 高速相机拍摄的等离子体通道图像和其圆柱形膨胀模型示意图

放电等离子体通道的阻抗决定了通道的沉积能量和电能向激波机械能转化的效率, 影响着液电脉冲激波的特性, 为了建立放电等离子体通道时变电阻与通道沉积能量之间的关系, 等离子体通道时变电阻模型可以表达为^[11]

$$R_{\text{ch}} = A_{\text{ch}} l^2 E_{\text{ch}}^{-1} \quad (5)$$

式中: A_{ch} 为高压脉冲击穿液体间隙的放电系数, 与电极结构形式和间隙液体介质性质有关, 本文液体间隙为水介质, 电极形式为针-板电极, 取值为 1.31×10^5 V²·sm⁻²。

液电式破碎放电回路的等效电路如图 3 所示, 其中 C 为主充电电容, L 为回路总电感。等效电路的表达式为

$$L \frac{di(t)}{dt} + (R_1 + R_{ch})i(t) - U_C(t) = 0 \quad (6)$$

式中: $i(t)$ 为放电电流, $U_C(t)$ 为电容电压。联立式 (1)~(3) 可以得到电路的微分方程组表达形式

$$\begin{cases} \frac{di^2(t)}{dt^2} + \frac{[R_1 + R_{ch}(t)]}{L} \frac{di(t)}{dt} + \frac{dR_{ch}(t)}{dt} \frac{i(t)}{L} + \frac{i(t)}{LC} = 0 \\ \frac{dR_{ch}(t)}{dt} = -\frac{1}{A_{ch}l^2} i^2(t) R_{ch}^3(t) \end{cases} \quad (7)$$

微分方程组的初始条件为 $i(0)=0$, $di/dt(0)=U_0/L$, 等离子体通道的电阻随着电流的上升而迅速下降至 $m\Omega$ 级, 因此通道电阻初始条件的选取对计算结果影响不大, 本文取 $R_{ch}(0)=10 \Omega$ 。根据式 (3), (4), (7) 可以得到放电等离子体通道的沉积能量 $E_{ch}(t)$ 和通道的体积 $V(t)$ 、激波初始压力 P_{sw_0} 的表达式为

$$P_{sw_0}(t) = P_{ch}(t) = \frac{(\gamma - 1)E_{ch}(t)}{\gamma V(t)} \quad (8)$$

液电脉冲激波在水中产生并以初始柱状波的形式向前传播, 激波压力近似以 $P_{sw} \propto D^{-\lambda}$ 的规律衰减, λ 为常数, 介于 0.5~1.0 之间。在远场条件下(大于 $10l$)时, 激波逐渐演化为较为均匀的球面波, 距离间隙中心水平位置 D 处的激波压力可以表示为^[12]

$$P_{sw_D}(t) = \frac{P_{sw_0}(t)}{D} \quad (9)$$

2.2 液电脉冲激波特性对碎岩的影响

影响目标岩石的致裂破碎的形态和效果的液电脉冲激波特性包括: 峰值压力 P_{peak} 、波前时间 t_r , 脉冲加载速率 v 和激波能量 E_{sw} 等。激波压力峰值是否大于岩石的断裂强度, 直接决定了岩石是否能够产生裂缝和破碎。波前时间的长短将影响着岩石中裂纹尖端的应力强度因子的大小, 较短的波前时间产生更多的短小裂纹, 较长的波前时间能产生更长的裂纹, 激波波前时间可以表示为^[13]

$$t_r = 1.25\Delta t_{10\%-90\%} \quad (10)$$

式中: $\Delta t_{10\%-90\%}$ 为激波压力波形上升时间内 10% 压力峰值和 90% 压力峰值的时间间隔。在液电脉冲激波破碎岩石的过程中, 激波能量转化为岩石断裂新生表面能量, 激波能量将直接影响岩石破碎的程度和破碎产物粒度的大小及分布。液电脉冲激波的实际总能量可由激波的实测波形得到, 其表达式为^[12]

$$E_{sw_measured} = \frac{4\pi D^2}{\rho_0 c_s} \int P_{sw_measured}^2(t) dt \quad (11)$$

式中: c_s 为水中声速, 约为 1500 m/s; $P_{sw_measured}$ 为实测激波压力波形。液电脉冲激波的加载速率会影响岩石的动态强度和破碎的形式^[14], 液电脉冲激波的加载速率 v 可以用激波压力峰值和波前时间的比值来表示

$$v = \frac{P_{peak}}{t_r} \quad (12)$$

3 液电脉冲激波特性的结果与分析

3.1 液电脉冲激波形成的典型过程

高压脉冲击穿水介质产生液电脉冲激波过程的典型波形如图 4(a) 所示, 电容充电电压为 15 kV, 电极间隙距离为 10 mm。预击穿时延为 9.52 μs 。主放电过程持续时间为 74.8 μs , 电流波形呈二阶振荡, 电流第一个峰值为 9.62 kA, 经过 6 个振荡半周期后, 电流衰减为 0。利用高速相机拍摄放电等离子体通道膨胀演化过程, 不同时刻的通道演化的光学图像如图 4(b) 所示, 以通道主放电开始为零时刻。等离子体通道膨胀形成空腔并辐射出强烈的液电脉冲激波, 激波在水介质中向前传播, 在水间隙中心水平距离 17 cm 处, 压力探头实际测得的激波压力峰值为 3.29 MPa, 当激波压力峰值大于目标岩石的断裂强度时, 可使岩石产生裂缝甚至破碎。

3.2 液电脉冲激波特性实测与仿真

典型的液电脉冲激波实际测量波形和数值仿真波形如图 5 所示, 电容充电电压为 15 kV, 电极间隙距离为 10 mm。液电脉冲激波的实测和仿真波形特性分析结果如表 1 所示, 激波压力波形的实测和仿真结果在激波压力

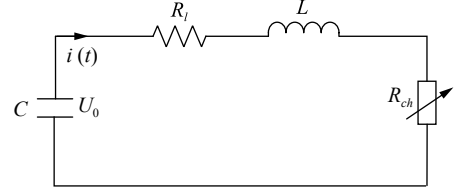
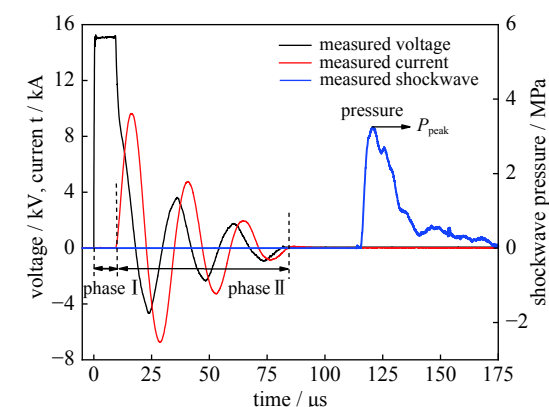
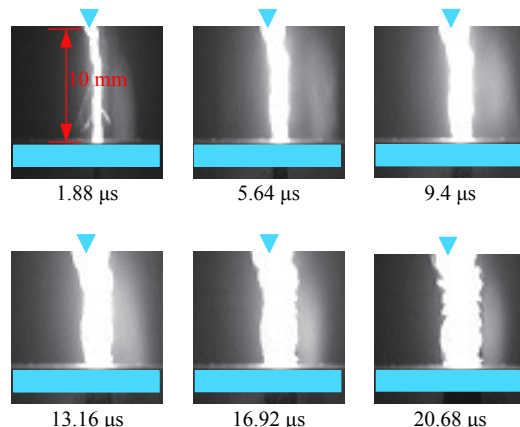


Fig. 3 Schematic of equivalent circuit for EHDR
图 3 液电式碎岩等效电路示意图



(a) typical waveforms of voltage, current and shockwave pressure



(b) images of plasma channel expansion captured by high speed camera

Fig. 4 Typical process of underwater high voltage pulsed discharge

图 4 水中高压脉冲放电典型过程

峰值和激波能量上相近, 实测结果略低于仿真结果的原因是, 数值仿真的过程中忽略了预击穿过程能量损失和光、声辐射能量等因素的影响。二者在波前时间和加载速率上稍有差异, 仿真的波前时间比实测的短, 加载速率比实测的快, 主要是由于表征等离子体通道膨胀和液电脉冲激波在水介质中传播的模型是理想的, 从而造成了激波的实测与仿真结果在动态特性上的差异。

改变电容的充电电压时, 等离子体通道电阻、通道沉积能量和激波能量的仿真结果如图 6 所示。随着电流的上升, 放电等离子体通道电阻迅速下降, 当电流到达首个半周期内的峰值时 ($t_{1/2}$ 时刻), 通道阻值下降到很小值 ($m\Omega$ 级) 并趋于稳定, 如图 6(a) 所示。同时, 等离子体通道的沉积能量随着电流的上升而迅速上升, 经过首个电流振荡半周期 (t_1 时刻), 沉积能量增加缓慢, 放电过程结束后, 沉积能量达到最

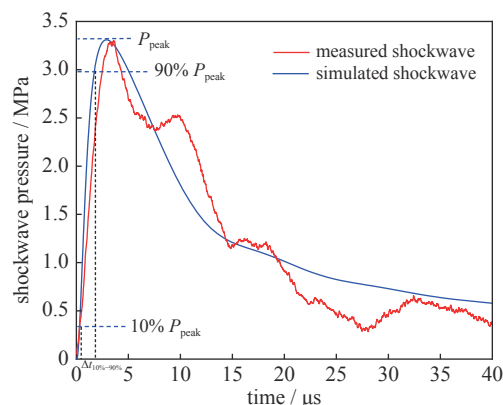


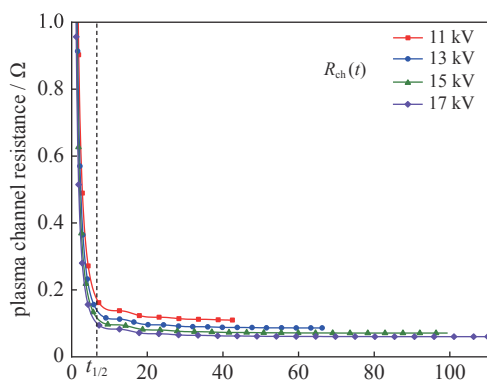
Fig. 5 Measured and simulated shockwave pressure ($U_C=15\text{ kV}$, $l=10\text{ mm}$)

图 5 典型的激波波形的实测和仿真结果 ($U_C=15\text{ kV}$, $l=10\text{ mm}$)

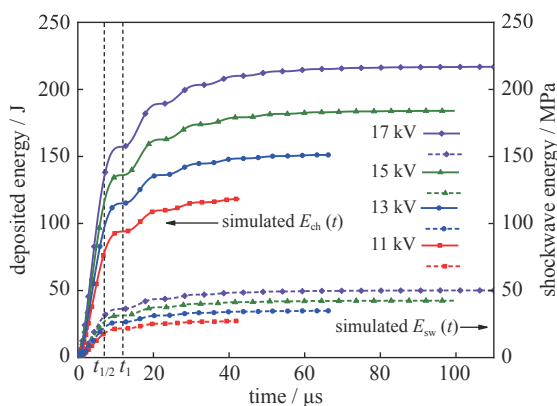
表 1 典型激波特性实测与仿真结果

Table 1 Measured and simulated results of typical shockwave characteristics

shockwave characteristics	$P_{\text{peak}} / \text{MPa}$	$t_r / \mu\text{s}$	$v / (\text{MPa}/\mu\text{s})$	E_{sw} / J
measurement	3.29	2.71	1.21	40.04
simulation	3.31	1.74	1.90	42.46



(a) varying resistance of plasma channel



(b) deposited energy of plasma channel

Fig. 6 Simulation results of plasma channel resistance and energy characteristic under different charge voltage

图 6 不同充电电压下等离子体通道电阻和量特性的仿真结果

大值,如图 6(b) 所示。从等离子体通道时变电阻和通道沉积能量的变化趋势可以看出,液电脉冲激波的形成过程主要与电流首个半周期有关(0~ t_1 内)^[15-16]。

定义电容储能向液电脉冲激波能量的转化效率为

$$\eta_{sw} = \frac{E_{sw}}{E_C} \times 100\% \quad (13)$$

电容充电电压为 11 kV 时,等离子体通道平均电阻为 3.61 Ω , 能量转化效率为 13.35%; 充电电压为 17 kV 时,通道平均电阻为 2.15 Ω , 能量效率最低为 10.25%, 通道平均电阻越大,电能转化为激波能量的效率越高。等离子体通道的平均电阻、通道沉积能量、激波能量和电能转化为激波能量效率随电容充电电压的变化趋势如图 7 所示,随着充电电压的提高,等离子体通道的平均电阻减小,等离子体通道沉积能量和激波能量增加,但电能转化为激波能量的效率降低。

不同充电电压下液电脉冲激波的仿真波形如图 8(a) 所示,电容充电电压为 17 kV 时,等离子体通道的沉积能量为 216.81 J, 激波机械能量为 50.08 J, 激波峰值压力为 3.59 MPa。电容电压为 11 kV 时,等离子体通道沉积能量为 204.49 J, 激波能量为 27.30 J, 激波压力峰值为 2.67 MPa。在液电式碎岩实际应用的过程中,提高装置脉冲电源的输出电压,固然能提高激波的强度,以期获得更好的岩石破碎效果,但同时也意味着碎岩过程中存在更大的能量损失、更低的能量利用效率和更差的经济效益。

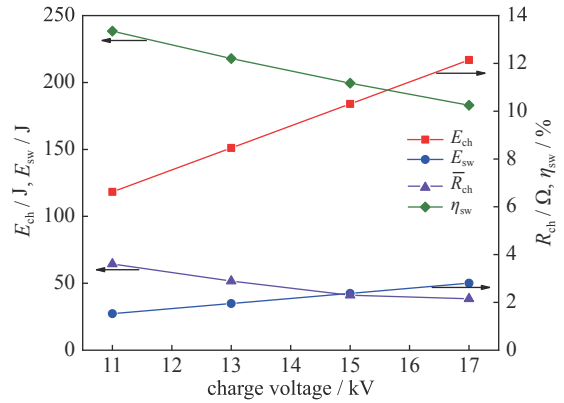
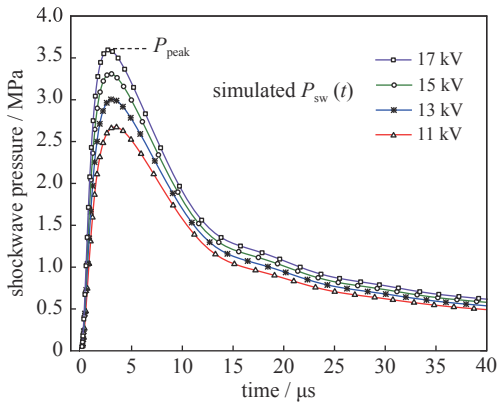
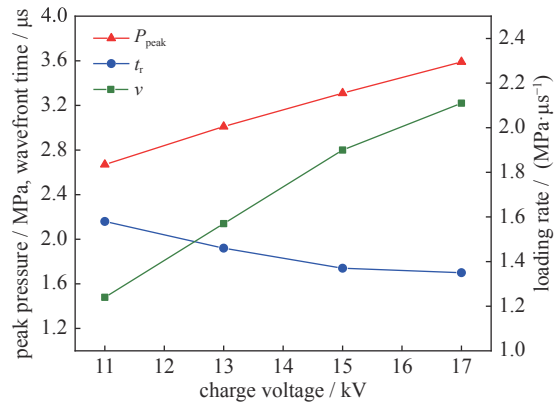


Fig. 7 Variation trend of average plasma channel resistance (R_{ch}), deposited energy (E_{ch}), shockwave energy (E_{sw}) and energy efficiency (η_{sw}) under different charge voltage

图 7 等离子体通道平均电阻、通道沉积能量、激波能量和能量效率随充电电压的变化趋势



(a) simulated waveforms of shockwaves



(b) variation trend of shockwave characteristics

Fig. 8 Simulated waveforms of shockwave under different charge voltage and variation trend of shockwave characteristics

图 8 不同充电电压下激波仿真波形和激波特性随充电电压的变化趋势

液电脉冲激波特性随电容充电电压的变化趋势如图 8(b) 所示,激波的波前时间与峰值压力、加载速率随电容充电电压变化趋势相反,充电电压为 11 kV 时,波前时间为 2.16 μs ,液电脉冲激波的加载速率为 1.24 MPa/ μs ; 充电电压为 17 kV 时,波前时间为 1.7 μs ,激波加载速率为 2.11 MPa/ μs 。电容充电电压的变化会造成液电脉冲激波特性的差异,电容充电电压越高,激波压力峰值越大,波前时间越短,激波加载速率越快。不同特性的液电脉冲激波破碎岩石,势必会造成不同的破碎形态和效果。但值得注意的是,电能向激波能量转化的效率随着电压的升高而下降,从能量利用效率和经济效益角度来看,电容充电电压并非越高越好,还要根据岩石破碎的能量利用效率确定最佳的电容充电电压。

4 结 论

本文利用相应的数学模型来表征液电脉冲激波的产生和传播规律,针对液电式碎岩过程中液电脉冲激波特性进行了分析。结果表明,电容充电电压越高,液电脉冲的压力峰值越大,波前时间越短,激波的加载速率越快,激波的能量越大。电容电压由 11 kV 提高到 17 kV 时,激波压力峰值由 2.67 MPa 增加到 3.59 MPa, 激波能量增加了 22.78 J, 波前时间由 2.16 μs 缩短为 1.7 μs , 激波的加载速率增加了 70.17%, 但电能转化为激波机械能的效率从

13.35% 下降到 10.25%。这些特性的不同将会造成激波碎岩效果和形态的差异。提高电容充电电压, 虽可以获得更大的激波压力峰值和更多的激波能量, 但电容储能转化为激波能量的效率降低, 液电式碎岩过程能量利用效率下降, 经济效益降低。

参考文献:

- [1] 张瑞强, 刘少军, 胡琼. 利用脉冲功率技术开采海底富钴结壳的试验研究[J]. 强激光与粒子束, 2017, 29: 065008. (Zhang Ruiqiang, Liu Shaojun, Hu Qiong. Experimental investigation of exploring marine co-rich crust using pulse power techniques[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2017, 29: 065008)
- [2] 付荣耀, 孙鹁鸿, 樊爱龙, 等. 高压电脉冲在页岩气开采中的压裂实验研究[J]. 强激光与粒子束, 2016, 28: 079001. (Fu Rongyao, Sun Yaohong, Fan Ailong, et al. Research of rock fracturing based on high voltage pulse in shale gas drilling[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2016, 28: 079001)
- [3] 施逢年. 矿石的高压电脉冲预处理技术研究进展——昆士兰大学JK矿物中心10余年成果回顾[J]. 金属矿山, 2019(5): 1-8. (Shi Fengnian. Progress on high voltage pulse technology used for ore pre-treatment——Overview of the research outcomes made by the Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre of the University of Queensland in the past 10 years[J]. Metal Mine, 2019(5): 1-8)
- [4] 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 Longcheng. Research progress of electro pulse boring rock breaking technology[J]. Geological Science and Technology Information, 2018, 37(6): 298-304)
- [5] 付荣耀, 孙鹁鸿, 刘坤, 等. 大水泥岩样的电脉冲压裂实验研究[J]. 强激光与粒子束, 2018, 30: 045007. (Fu Rongyao, Sun Yaohong, Liu Kun, et al. Experimental study of fracturing under electric pulse for large cement sample[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2018, 30: 045007)
- [6] 张永民, 邱爱慈, 秦勇. 电脉冲可控冲击波煤储层增透原理与工程实践[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(9): 79-85. (Zhang Yongmin, Qiu Aici, Qin Yong. Principle and engineering practices on coal reservoir permeability improved with electric pulse controllable shock waves[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(9): 79-85)
- [7] Martin E A. Experimental investigation of a high-energy density, high-pressure arc plasma[J]. *Journal of Applied Physics*, 1960, 31(2): 255-267.
- [8] Sun B, Kunitomo S, Igarashi C. Characteristics of ultraviolet light and radicals formed by pulsed discharge in water[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2006, 39(17): 3814-3820.
- [9] Timoshkin I V, Fouracre R A, Given M J, et al. Hydrodynamic modelling of transient cavities in fluids generated by high voltage spark discharges[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2006, 39(22): 4808-4817.
- [10] Axel W H K. Pulsed power discharges in water[D]. California: California Institute of Technology, 1996.
- [11] Liu S W, Liu Y, Lin F C, et al. Influence of plasma channel impedance model on electrohydraulic shockwave simulation[J]. *Physics of Plasmas*, 2019, 26: 023522.
- [12] 王一博. 水中等离子体声源的理论及实验研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2012. (Wang Yibo. Theoretical and experimental study of the underwater plasma acoustic source[D]. Changsha: Graduate School of National University of Defense Technology, 2012)
- [13] 贾少华, 赵金昌, 尹志强, 等. 基于高压电脉冲煤体增透的水激波波前时间变化规律研究[J]. 太原理工大学学报, 2015, 46(6): 680-684, 690. (Jia Shaohua, Zhao Jinchang, Yin Zhiqiang, et al. Research on change laws of front time in water shock-wave based on pulsed high-voltage discharge in permeability enhancement in coal seams[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2015, 46(6): 680-684, 690)
- [14] 尹志强, 赵金昌, 贾少华, 等. 基于高压电脉冲的水激波加载特性的实验研究[J]. 煤炭技术, 2016, 35(6): 182-185. (Yin Zhiqiang, Zhao Jinchang, Jia Shaohua, et al. Experimental study of water shock load characteristics based on high-voltage pulsed discharge[J]. Coal Technology, 2016, 35(6): 182-185)
- [15] 李显东, 刘毅, 李志远, 等. 不均匀电场下水中脉冲放电观测及沉积能量对激波的影响[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(10): 3028-3036. (Li Xiandong, Liu Yi, Li Zhiyuan, et al. Observation of underwater pulse discharge and influence of deposited energy on shock wave in non-uniform electric field[J]. Proceedings of CSEE, 2017, 37(10): 3028-3036)
- [16] Li C, Duan L, Tan S, et al. Damage model and numerical experiment of high-voltage electro pulse boring in granite[J]. *Energies*, 2019, 12(4): 727.