高电压脉冲放电破岩系统建模分析

徐 尤 来^{1*} 刘 毅^{1.2} 黄 仕 杰² 李 化^{1,2} 林 福 昌^{1,2} (1. 强电磁工程与新技术国家重点实验室 电气与电子工程学院 华中科技大学 武汉 430074; 2. 脉冲功率技术教育部重点实验室 华中科技大学 武汉 430074)

Simulation of High Voltage Pulse Rock Breaking System

XU Youlai^{1*}, LIU Yi^{1,2}, HUANG Shijie², LI Hua^{1,2}, LIN Fuchang^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. Key Laboratory of Pulsed Power Technology (Huazhong University of Science and Technology), Ministry of Education, Wuhan 430074, China)

Abstract Plasma channels are the "tools" for high-voltage pulse discharge to break rock; the formation and expansion of the channels cause the rock crushing process with sharp changes in the impedance of the channels. In order to analyze the energy utilization efficiency of the high voltage pulse discharge rock breaking system, combined with the demolding analysis of rock breaking cavity to obtain the penetration depth and actual length of the channel, a plasma channel impedance model is established based on the energy balance equation. Then a circuit analysis model of the high voltage pulse discharge rock breaking system is established; the simulation and test results show that the model can accurately analyze the output characteristics of the high voltage pulse discharge rock breaking system, which provides theoretical guidance for system optimization.

Keywords High-voltage pulse rock breaking, Channel resistance model, Cavity demolding, Distributed parameters, Circuit simulation

摘要 等离子体通道是高电压脉冲放电破岩的"工具",通道形成及膨胀使岩石破碎过程伴随着通道阻抗的急剧变化。 为更好地分析高电压脉冲放电破岩系统的能量利用效率,结合破岩空腔的脱模分析获得了通道的穿透深度及实际长度,基于 能量平衡方程建立了等离子体通道阻抗模型,建立了高电压脉冲放电破岩系统的电路分析模型,仿真计算与试验结果对比表 明该模型能够准确分析高电压脉冲放电破岩系统的输出特性,为系统优化提供理论指导。

高电压脉冲放电破岩是一种新型高效的钻井 技术,在深层或复杂地层油气、地热资源开发以及 基建的桩基建设等领域具有广泛的应用前景。当 放电电极处在岩石-液体组合介质的交界面时,通过 施加快速上升的电压脉冲可使得岩石的击穿电压 低于液体,放电通道形成在岩石内部^[1-2]。快速注入 通道的电能使得其加速膨胀而辐射强烈的冲击波, 诱导岩石裂缝并导致其破碎,多次高压放电的累积 效应使得岩石大体积破碎而完成钻进。高电压脉 冲放电破岩涉及电能向机械能转换过程,工作电压 上升时间为数百纳秒而工作电流振荡周期为数微 秒,工作电压与工作电流等值频率高,分布参数与 放电通道的非线性阻抗特性等直接影响到能量的 时空分布规律,进而影响高电压脉冲驱动源与放电 电极的优化匹配设计。因此,开展高电压脉冲破岩 系统的建模分析,能够预测能量转换过程中的关键 因素及其作用规律,为高电压脉冲驱动源和放电电 极的优化设计提供理论指导。

高电压脉冲放电破岩系统的负载工况在等离 子体通道形成前后存在显著的变化。等离子体通 道形成前,负载为破碎电极间的泄漏电阻与分布电容。为满足高电压脉冲放电破岩脉冲陡度要求,驱动源常采用电容储能型驱动源,等离子体通道形成前的负载特性对输出电压上升速率影响显著^[3]。液体介质对负载分布电容的影响很大,破碎电极在水介质中的分布电容为变压器油中的数十倍^[4]。在输出电压上升阶段,系统工作等值频率高,受到电源内诸多分布参数的影响,导致输出电压上升特性难以预测^[5-6]。针对特定负载,考虑电源的分布参数能够较好地预测输出电压的上升特性,但是忽略了等离子体通道阻抗时变特性,难以准确分析负载电压的动态变化过程^[7]。

等离子体通道形成后,系统负载转化为迅速下 降的等离子体通道阳抗,其稳定值远小于破碎电极 泄漏阻抗^[8-9]。将岩石击穿后等离子体通道考虑成 恒定阻抗,或考虑了放电通道阻抗的时变特性而未 考虑分布参数的影响,使得仿真结果与实测数据存 在较大的差异^[1,6]。现有岩石中的等离子体通道阻 抗模型多基于气体与液体通道模型的研究成果,将 岩石中等离子体通道考虑为圆柱体,忽略等离子通 道的热辐射、光辐射等耗散能量,通过能量平衡方 程以及 Rompe-Weizel 经验公式得到时变电阻特性, 预测岩石击穿后的能量转换特性[10-11]。假设通道中 的气体由离子水产生,并且混合气体是具有恒定比 热比的理想气体,可以获得通道时变电阻与通道内 能的经验公式[12-13]。将气体放电通道阻抗模型应用 于岩石击穿后的等离子体通道阻抗特性分析,会使 得求解的通道电阻下降过快[14]。岩石作为固体介质, 等离子体通道膨胀相对于气体、液体更加困难,且 通道在岩石内部会发生弯曲,导致通道长度更长. 通道时变阻抗的经验公式无法直接使用。根据阿 伦尼乌斯方程以及功率输入与黑体辐射耗散的平 衡可以更好分析通道的能量转换过程,但是对于快 速膨胀的等离子体通道求解过程复杂[15]。考虑通道 膨胀过程中能量转化过程、温度以及时变电导率的 影响,建立岩石中的电弧阻抗模型,能够准确反映 通道发展过程中阻抗、半径等参数的变化,但是由 于岩石为非透明介质,难以直接观测等离子体通道 的发展过程并确定其长度^[9]。现有研究多针对负载 为恒定阻抗的情况,没有耦合等离子体通道的非线 性时变特性和分布参数的影响,在电路分析的精度 上存在一定差异,难以对高电压脉冲放电破岩系统 的工作特性进行精确预测。

为了分析高电压脉冲放电破岩系统中的能量 时空分布规律,构建高电压脉冲放电破岩试验平台, 采用空腔脱模方法获得岩石中等离子体通道的实 际穿透深度及长度。基于等离子体通道能量平衡 方程建立岩石击穿后等离子体通道非线性时变电 阻模型,构建高电压脉冲放电破岩系统电路仿真模 型,并与试验结果进行对比分析,为高电压脉冲放 电破岩技术的应用提供理论指导。

1 高电压脉冲放电电极负载阻抗特性分析

高电压脉冲放电破岩系统电路等效模型如 图 1 所示,其中 C 为驱动源储能电容,其工作电压 为 U_{em}; L 为回路电感; R 为回路电阻; R_w、C_w分别为 电极泄漏电阻和分布电容; S 为控制电压脉冲输出 的开关; T 为模拟岩石击穿的开关; R_e(t)、L_e(t)分别 为等离子体通道时变电阻和时变电感。







高电压脉冲放电破岩等离子体通道形成前,电 极等效为泄漏电阻与分布电容组成的并联负载;等 离子体通道形成后,电极等效为等离子体通道时变 电阻与电感组成的串联负载。通道形成前负载特 性影响负载电压的上升特性,决定岩石能否击穿; 通道形成后的负载特性影响通道内能量沉积与应 力波的强度,决定岩石能否破碎。

1.1 等离子体通道形成前

在等离子体通道形成前,令电容两端电压为 $U_{c}(t)$,负载两端电压为 $U_{0}(t)$,回路总电流为i(t),经过 R_{w} 的电流为 $i_{1}(t)$,经过 C_{w} 的电流为 $i_{2}(t)$,回路的方程可以表示为

$$U_c(t) = i(t)R + \frac{L\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t} + U_0(t) \tag{1}$$

$$U_0(t) = i_1(t)R_{\rm w} = \frac{\int i_2(t)\,\mathrm{d}t}{C_{\rm w}} \tag{2}$$

$$i(t) = i_1(t) + i_2(t)$$
(3)

该工况下系统输出电压处于上升阶段,破碎电 极的负载阻抗较大,回路处于过阻尼状态。而电源 回路电阻较小,输出电压上升时间主要取决于回路 电感与破碎电极的负载阻抗。高电压脉冲放电破 岩液体工作介质需具备环保、易获取等特点,常采 用具有高电导率与高介电常数的自来水^[16]。破碎电 极设计显著影响负载阻抗,对于复杂的爪状电极, 可采用有限元分析计算电极的分布电容与泄漏 电阻。

1.2 等离子体通道形成后

等离子体通道形成后,电极阻抗为泄漏电阻、 分布电容以及通道阻抗并联,电极阻抗会在极短的 时间内迅速下降,通道阻抗远小于击穿前电极的分 布电容容抗与泄漏电阻,故击穿后可忽略分布电容 和泄漏电阻的影响^[17]。系统负载由图1红色框线中 等离子体通道时变电阻与时变电感串联组成。

等离子体通道中电感分量约为电阻分量的 20%,故分析时对其进行忽略^[18]。岩石击穿后的回 路方程可以表示为

$$U_c(t) = i(t)(R + R_c(t)) + L\frac{\mathrm{d}i(t)}{\mathrm{d}t} \qquad (4)$$

岩石中等离子体通道作为电能向机械能转化 的工具。基于通道发展过程中的能量平衡方程,可 建立等离子体通道的时变电阻模型^[9]。

$$\begin{cases} (R + R_{c}(t))i(t) + L\frac{di(t)}{dt} = U_{c}(t) \\ W_{in}(t) + W_{m}(t) + W_{rad}(t) = E_{c}(t) \\ \frac{dn(t)}{dt} = \frac{2}{r(t)} \left[\frac{f\sigma_{s}T(t)^{4}}{\varepsilon_{s}} - n(t)\frac{dr(t)}{dt} \right] \qquad (5) \\ \frac{dr(t)}{dt} = \frac{\sqrt{7}\alpha^{1/14}}{3\sqrt{\rho_{0}}} ((p(t) + \beta)^{3/7} - \beta^{3/7}) \end{cases}$$

式中 $W_{in}(t)$ 为等离子体通道内能; $W_{m}(t)$ 为通道膨胀 对外做功; $W_{rad}(t)$ 为对外辐射能量; $E_{c}(t)$ 为通道沉积 能量; n(t) 为通道中粒子数; r(t) 为通道半径; σ_{s} 为斯 忒藩-玻尔兹曼常数, $\sigma_{s}=5.67\times10^{-8}$ W·m⁻²·K⁻⁴; f 为通 道周围液体薄层吸收的电磁辐射分数, f=0.2; T(t)为通道温度; ε_{s} 为介质转换为等离子体的能量, $\varepsilon_{s}=9.74\times10^{-19}$ J; α 、 β 为试验系数, 针对花岗岩 $\alpha=300.1$ MPa, $\beta=300$ MPa; ρ_{0} 为固体密度; p(t) 为通道压强。

该模型基于能量平衡方程与回路电压方程,考 虑了等离子体通道发展过程中温度、辐射等影响, 将等离子体通道等效为径向均匀膨胀的圆柱体,有

$$E_{\rm c}(t) = \int i(t)^2 R_{\rm c}(t) \mathrm{d}t \qquad (6)$$

$$W_{\rm in}(t) = \frac{p(t) \cdot V(t)}{\gamma - 1} \tag{7}$$

$$W_{\rm m}(t) = \int p(t) \mathrm{d}V(t) \tag{8}$$

$$W_{\rm rad}(t) = \int (1-f)\sigma_{\rm S} \cdot T(t)^4 \cdot S(t) dt \qquad (9)$$

式中, V(t) 为等离子体通道体积。对于圆柱形通道, $V(t)=\pi r(t)^2 l_{ch}$, l_{ch} 为通道长度; γ 是有效绝热系数, $\gamma=1.12; p(t)$ 为通道压强。利用理想气体描述电弧等 离子体有

$$p(t) = n(t)kT(t) \tag{10}$$

式中, k 为玻尔兹曼常数, k=1.380649×10⁻²³ J/K。考 虑时变电导率 σ(t),等离子体通道电阻为

$$R_{c}(t) = \frac{l_{\rm ch}}{\pi r(t)^{2} \sigma(t)}$$
(11)

$$\sigma(t) = \varepsilon T(t)^{\frac{3}{2}} e^{\frac{-5000}{T(t)}}$$
(12)

式中 ε 为常数, 对于花岗岩, ε=0.00385 K^{-1.5}Ω⁻¹m⁻¹。

2 高电压脉冲放电通道特性试验研究

2.1 高电压脉冲放电破岩试验平台

构建的高电压脉冲破岩试验平台如图 2 所示, 驱动源采用额定输出电压为 500 kV、额定储能为 5 kJ的 Marx 发生器。放电容器为 500 mm×500 mm× 500 mm的不锈钢箱体,两侧留有直径为190 mm圆 形玻璃观测窗口。利用配有 18-200 mm 焦距镜头 的高速相机(Phantom V1612)记录放电过程中的图 像。相机采样速度设置为 3.93 us/帧,曝光时间为 0.76 us。岩石放置在水箱底部,通过升降平台调节 岩石与电极之间的垂直距离。液体介质采用电导 率 34.7 mS/m 的自来水。放电电极为直径 30 mm、 高度 15 mm 的圆形平板电极,电极材料为钨含量 90%的钨铜合金。分别采用高压分压器(North Star VD-200)和电流线圈(Pearson 1330)测量岩石破碎 过程中放电通道的电压和电流信号,利用示波器 (Tektronix MSO54)进行记录。考虑到脉冲大电流 放电会引起强烈的电磁干扰,测量设备均采用不间 断电源独立供电,上位机与高速相机之间进行光电 隔离通信。

2.2 高电压脉冲放电破岩典型试验结果

针对花岗岩-自来水介质组合,在破碎电极间 距3 cm 工况下,岩石多次破碎效果如图 3 所示,其 中 n 为脉冲个数。高压电脉冲作用下,岩石的破碎 具有累积性。岩石破碎依赖于等离子体通道,在等



图2 高电压脉冲放电破岩试验平台



离子体通道上方,等离子体通道膨胀产生的应力波 以及固液分界面反射的应力波共同作用为拉剪应 力;在等离子体通道下方,等离子体通道膨胀产生 的应力为压剪应力^[19]。岩石的抗拉强度远小于其抗 压强度,等离子体通道上方岩石发生塑性破坏,岩 层剥离形成空腔,等离子体通道下方的岩层被压剪 破碎,在破碎空腔内形成最深的破碎路径,而等离 子通道下方岩层破坏较小,故破碎空腔最深路径的 长度与等离子体通道长度接近。



图3 3 cm 电极间距下岩石破碎效果 Fig. 3 The rock crushing effect under 3 cm electrode distance

岩石为多种介质组成的混合物且内部存在孔 隙,等离子体通道的形成与发展存在分散性,破碎 空腔内部的最深路径长度难以直接测量。利用石 膏对破碎空腔进行脱模处理,不同电极间距与脉冲 作用下破碎空腔脱模结果如图4所示。通过脱模结 果利用游标卡尺测量破碎空腔最深路径的长度,结 果如表1所示。岩石破碎空腔最深路径的长度随电 压脉冲个数增加以及电极间距增大而增大。破碎 空腔最深路径的长度大于电极间距,原因为破碎电 极位于岩石同侧,等离子体通道经过岩石内部时, 等离子体通道发生弯曲,随着脉冲次数增加,破碎 深度提高,岩石击穿时等离子体通道弯曲程度与等 离子体通道长度会进一步增大。



图4 不同电极间距下试验脱模结果

Fig. 4 The plaster models of different electrode distance

表1 不同条件下岩石破碎最深路径长度

Tab. 1 The length of the deepest path of rock fragmentation under different conditions

电极间距 d ₂ /cm	脉冲个数 N	长度 l/mm	
1	3	32.40	
	6	41.40	
	9	62.98	
	12	69.70	
3	3	54.81	
	6	55.56	
	9	60.31	
	12	78.87	
5	3	65.24	
	6	80.81	
	9	100.04	

3 高电压脉冲放电破岩系统电路建模分析

针对高电压脉冲放电破岩试验平台,为考虑系统分布参数、岩石击穿前后不同工况的转换以及岩石击穿过程中的时变阻抗特性,准确地对系统输出特性进行预测,在 Pspice 搭建高电压脉冲放电破岩系统仿真模型,如图 5 所示。C 为储能电容; R_f 为波前电阻; R_t 为波尾电阻; R_i 为充电电阻; L_g 为火花开

关导通通道电感与结构电感之和; C_g 代表火花开关 电极之间的极间分布电容; R_g 为火花开关导通电阻; g 为球隙火花开关, 其导通时间为 T_1 ; 由于分压器难 以直接对破碎电极两端电压进行测量, 分压器测量 电压包括部分输出回路电感的电压, 令 L_1 为驱动源 结构电感与未接入分压器的输出回路电感之和; L_2 为接入分压器的输出回路电感; L_p 为电容器分布电 感; C_s 为对地分布电容; R_w 为放电电极之间的泄漏 电阻; C_w 为放电电极之间的分布电容; 利用开关 S的通断来模拟岩石的击穿, 开关导通时间即为岩石 实际击穿时间 T_2 ; R_c 为岩石击穿后等离子体通道电 阻; L_c 为岩石击穿后等离子体通道电



图5 高电压脉冲放电破岩系统电路仿真模型

Fig. 5 The circuit simulation model of high-voltage pulse discharge rock breaking system

表 2 高电压脉冲放电破岩系统主要电气参数

Tab. 2 The main electrical parameters of high-voltage pulse discharge rock breaking test platform

		-	
电气参数	数值	电气参数	数值
$L_1/\mu H$	12.93	$L_{\rm g}/{ m nH}$	149
$R_{ m f}/\Omega$	0.6	$C_{\rm g}/{ m pF}$	4
$R_{\rm t}/\Omega$	170	$C_{\rm s}/{\rm pF}$	17.8
$C/\mu F$	0.2	$R_{ m g}/\Omega$	0.15
$U_{\rm c}/{ m kV}$	70	T_1/ns	30
$L_{\rm p}/{\rm nH}$	30	$L_2/\mu\mathrm{H}$	2.72

电极设计对破碎电极负载阻抗影响显著,在不同电极间距下,将破碎电极导杆视为长直导线,岩石击穿前破碎电极分布电容与泄漏电阻如表 3 所示。

由于电弧通道长度无法直接测量,由试验脱模 结果估计电弧长度,对于 1,3 与 5 cm 电极间距,电 弧通道长度分别为 1.4,4.5 与 7.2 cm,通道阻抗模型 中变量的初值为 $r(0)=2.2\times10^{-4}$ m、 $n(0)=5\times10^{24}/m^3$ 、 T(0)=19000 K。1,3 与 5 cm 电极间距下,岩石中通 道电阻随时间变化如图 6 所示,通道电阻稳定值分

表 3 不同电极间距下的分布电容与泄漏电阻

Tab. 3 The distributed capacitance and leakage resistance under different electrode distances

电极间距/cm	分布电容 C _w /nF	泄漏电阻 R_w/Ω
1	0.487	82
3	0.324	105
5	0.271	126

别为 0.4, 1.6, 2.8 Ω, 电弧通道稳定时单位长度电阻 约为 28.6, 35.6, 38.8 mΩ/mm。岩石击穿后等离子体 通道迅速膨胀, 温度上升, 通道电阻由绝缘状态下 降到稳定值; 维持稳定值一段时间后, 通道膨胀速 度与温度下降, 通道电阻逐渐上升, 绝缘逐渐恢复。 随着电极间距的增加, 岩石击穿前后破碎电极的负 载等效阻抗均会增大, 而岩石击穿后等离子体通道 阻抗下降速度减缓。







不同电极间距下,仿真模型的输出特性与试验 结果对比如图 7 所示,定义电流峰值与次波峰值之 比为衰减比,关键参数的仿真计算值与试验值对比 如表 4 所示。考虑负载工况转换、系统分布参数以 及电弧通道阻抗时变特性的影响,建立的电路仿真 模型仿真结果符合实际岩石破碎工况,能够与试验 结果较好的吻合。

输出电压下降沿的跌落是岩石击穿后通道阻抗的迅速下降引起的,考虑通道时变阻抗模型能够较好地反映该过程。试验中等离子体通道长度与膨胀速度的不同,会导致不同的电压下降沿特性。 通道膨胀速度越快,通道阻抗下降越迅速,导致输出电压下降沿的跌落幅度越大。岩石击穿,电路工作于欠阻尼状态,输出电流峰值会随通道阻抗的上



图7 不同电极间距下仿真波形与试验数据对比。(a) 1 cm, (b) 3 cm, (c) 5 cm

Fig. 7 Comparison between simulation waveforms and test data under different electrode distances. (a) 1 cm, (b) 3 cm, (c) 5 cm

升而下降,故间隙距离的增大会降低输出电流的幅 值。岩石击穿后,影响电流峰值的主要因素为回路 电感,试验与仿真的电流峰值存在较大的误差,原 因可能有两点:一是实际放电回路并不是规则的平 面矩形,利用平面矩形回路计算回路电感导致回路 电感较小;二是由于仿真时忽略了岩石击穿通道电 感的变化,岩石内部通道较气、液介质中膨胀更加 困难,通道半径较小,电感的影响增大。等离子体 通道膨胀将会使得通道下方的岩石发生破碎,实际 电弧长度小于破碎空腔最深路径长度,根据空腔脱

Tab. 4 The main parameters of experimental and simulation waveforms

参数	电极间距/cm	试验	仿真	偏差
电压峰值/kV	1	275	270	1.8%
	3	313	304	2.9%
	5	316	313	0.9%
电流峰值/kA	1	12.4	13.5	8.9%
	3	11.4	12.3	7.9%
	5	11.1	12.1	9.0%
电流振荡周期/μs	1	5.13	5.17	0.8%
	3	5.15	5.21	1.2%
	5	5.17	5.28	2.1%
衰减比	1	2.14	2.18	1.8%
	3	2.39	2.47	3.3%
	5	2.78	2.83	1.8%
电压上升时间/ns	1	230	219	4.7%
	3	244	243	0.4%
	5	228	216	5.3%

模结果选取的通道长度可能略大于实际电弧长度, 导致阻抗模型计算结果偏大。球隙开关击穿时间 的随机性以及电极烧蚀对开关特性的改变,会导致 相同试验条件下的输出电压波前特性发生变化,目 前电路建模分析过程难以考虑其影响^[20-21]。

4 结论

高电压脉冲破岩过程中负载阻抗存在较大范 围的变化,在等离子体通道形成前,负载为破碎电 极分布电容与泄漏电阻组成的 RC 并联负载;在等 离子体通道形成后,负载为等离子体通道中时变电 阻与时变电感组成的 RL 串联负载。本文针对不同 的负载工况分别进行分析,建立电弧通道阻抗模型, 通过石膏脱模测取破碎空腔最深破碎路径长度选 取电弧通道长度,计算获得350kV电压脉冲作用下, 1.3以及5cm电极间距的花岗岩电弧通道单位长 度电阻为 28.6, 35.6 以及 38.8 mΩ/mm, 电弧通道单 位长度电阻随电极间距增大。考虑负载工况转换、 系统分布参数以及电弧通道阻抗时变特性,建立高 电压脉冲放电破岩系统的电路仿真模型,仿真结果 与试验结果吻合良好,能够准确地预测高电压脉冲 破岩系统的输出特性。建模时仅考虑了通道电阻 的时变特性,而忽略了通道电感随时间的变化,考 虑到岩层中通道更细,电感的影响较空气、液中影 响要大,在后续研究中将探究通道发展过程中电感 的时变特性。

参考文献

- [1] Kozlova N V, Egorova M S, Safrygin M Yu. Evaluation and improvement of economic efficiency in the sphere of bore-hole drilling methods[J]. SHS Web of Conferences, 2016, 28: 01126
- [2] Sperner B, Jonckheere R, Pfander J A. Testing the influence of high-voltage mineral liberation on Grain size, shape and yield, and on fission track and 40Ar/39Ar dating[J]. Chemical Geology, 2014, 371: 83–95
- [3] Kovalchuk B M, Kharlov A V, Kumpya E V, et al. High-voltage pulsed generators for electro-discharge technologies
 [J]. Journal of Instrumentation, 2013, 8(09): P09012–P09012
- [4] Anders E, Voigt M, Lehmann F, et al. Electric impulse drilling: the future of drilling technology begins now[J].
 Volume 8:Polar and Arctic Sciences and Technology; Petroleum Technology. Trondheim, Norway:American Society of Mechanical Engineers, 2017: V008T11A024
- [5] Ma Chenggang, Li Xiqin, Li Yawei, et al. Development of 150 kV fast risetime low jitter Marx generator[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2015, 27(04): 198–201 (马成刚,李玺钦,李亚维,等. 150 kV快前沿低抖动 Marx发生器研制[J]. 强激光与粒子束, 2015, 27(04): 198–201(in chinese))
- [6] Dong Shoulong, Yao Chenguo, Yang Nan, et al. The development of solid-state nanosecond pulsed plasma jet apparatus based on Marx structure[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(24): 35–44 (董守龙,姚陈果,杨楠,等. 基于Marx电路的全固态纳秒脉冲等离子体射流装置的研制[J]. 电工技术学报, 2016, 31(24): 35–44(in chinese))
- [7] Voigt M, Anders E, Lehmann F, et al. Electric impulse technology – breaking rock[J]. 2020 22nd European Conference on Power Electronics and Applications (EPE '20 ECCE Europe). Lyon, France:IEEE, 2020; 1–P.10
- [8] Liu Yi, Huang Shijie, Zhao Yong, et al. Analysis of arc impedance characteristics of high current pulsed discharge in liquid[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(07): 2591-2598 (刘毅, 黄仕杰, 赵勇, 等. 液中大电 流脉冲放电电弧阻抗特性分析[J]. 高电压技术, 2021, 47(07): 2591-2598(in chinese))
- [9] Huang Shijie, Liu Yi, Lin Fuchang, et al. Analysis of arc impedance characteristics in high-voltage electric pulse discharge rock destruction system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(19): 4978-4988 (黄 仕杰, 刘毅, 林福昌, 等. 高压脉冲放电破岩电弧阻抗特 性分析[J]. 电工技术学报, 2022, 37(19): 4978-4988(in chinese))
- [10] Ushakov V Y, Vajov V F, Zinoviev N T. Electro-discharge technology for drilling wells and concrete destruc-

tion[M]. 2019: 55-65

- Burkin V V, Kuznetsova N S, Lopatin V V. Dynamics of electro burst in solids: I. power characteristics of electro burst[J]. Journal of Physics D:Applied Physics, 2009, 42(18): 185204
- [12] Braginskii S I. Theory of the development of a spark channel[J]. Sov Phys JETP, 1958, 34: 1068–1074
- [13] Martin T H, Seamen J F, Jobe D O. Energy losses in switches[J]. Ninth IEEE International Pulsed Power Conference. Albuquerque, NM, USA:IEEE, 1993: 463.5
- [14] Zhang Zhicheng, Pei Yanliang, Liu Zhen, et al. Experimen-tal research on rock breakdown under short high-voltage pulse[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(07): 1719–1725 (章志成,裴彦良,刘振,等. 高压短脉冲作用下岩石击穿特性的实验研究[J]. 高电压技术, 2012, 38(07): 1719–1725(in chinese))
- [15] 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(09): 1146-1162 (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(09): 1146-1162(in chinese))
- [16] VVazhov V F, Gafarov R R, Datskevich S Y, et al. Electric-pulse breakdown and the breakage of granite[J]. Technical Physics, 2010, 55(6): 833–838
- [17] Liu S W, Liu Y, Ren Y J, et al. Influence of plasma channel impedance model on electrohydraulic shockwave simulation[J]. Physics of Plasmas, 2019, 26(2): 023522
- [18] Kushner M J, Kimura W D, Byron S R. Arc resistance of laser-triggered spark gaps[J]. Journal of Applied Physics, 1985, 58(5): 1744–1751
- [19] Burkin V V, Kuznetsova N S, Lopatin V V. Dynamics of electro burst in solids: II. characteristics of wave process
 [J]. Journal of Physics D:Applied Physics, 2009, 42(23): 235209
- [20] Xie Changming, Tan Xiaohua, Du Tao, et al. Microstructure characteristics in electrodes of gas spark gap after erosion[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(20): 246-251 (谢昌明, 谈效华, 杜涛, 等. 气体火花开关电极烧蚀形貌研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(20): 246-251(in chinese))
- [21] Cheng Xian, Li Taiyu, Ge Guowei, et al. Development of coaxial spark switch and experimental study on its trigger characteristics[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(16): 3480–3486 (程显, 李泰煜, 葛国 伟,等. 同轴型火花开关研制及其触发特性试验研究[J]. 电工技术学报, 2019, 34(16): 3480–3486(in chinese))