

水中丝爆等离子体破岩机理研究

马 瑞¹, 周世生¹, 胡燕川¹, 孙西濛¹, 薛启龙^{2,3}, 曲 骏^{2,3}

(1.北京市政路桥股份有限公司,北京 100045; 2.中国地质大学(北京)工程技术学院,北京 100083;
3.自然资源部深部地质钻探技术重点实验室,北京 100083)

摘要:在隧道开挖、矿山开采等基础工程建设中,岩石爆破技术发挥着重要作用。等离子体碎岩技术具有无污染,破碎过程中无飞石、无有害气体的产生,使用方便,作业效率高,是替代炸药碎岩的最有效可行的方法。本文研究了水中丝爆产生等离子体破碎岩石的机理,分析了高电压脉冲放电过程中的铜丝融化过程,建立了铜丝在各阶段变化的电阻模型,利用 MATLAB 对不同阶段放电电路的电流进行了数值仿真分析,并与实验得到的电流波形进行对比。研究发现,电流波形,上升沿时间越短,脉冲放电效果越好。铜丝变化产生等离子体的过程中,等离子体通道具有一定的电阻性。实验数据结果与模型数值计算结果基本相符。

关键词:丝爆;高电压脉冲放电;等离子体;破碎岩石;放电模型

中图分类号:P633.2;TD235.3;TV554⁺.1;U455.41 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2019)11-0001-07

Rock breaking mechanism of underwater wire explosion plasma

MA Rui¹, ZHOU Shisheng¹, HU Yanchuan¹,

SUN Ximeng¹, XUE Qilong^{2,3}, QU Jun^{2,3}

(1.Beijing Municipal Road and Bridge Co., Ltd., Beijing 100045, China;

2.School of Engineering and Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

3.Key Laboratory of Deep Geodrilling Technology, Ministry of Natural Resources, Beijing 100083, China)

Abstract: Rock blasting technology plays an important role in the construction of infrastructural projects such as tunnel excavation and mining. The plasma rock breaking technology is characterized with no pollution, no flying stones or harmful gases in the blasting process, easy operation and high efficiency, and is the most effective and feasible method to replace the explosive. In this paper, the rock breaking mechanism of plasma generated by underwater wire explosion is studied. The process of copper wire melting during high-voltage pulse discharge is analyzed. The resistance model of copper wires changes at various stages is established. Numerical simulation analysis is performed of the current of the discharge circuit at different stages with MATLAB and compared with the experimental current waveform. The study finds that the shorter the rising edge time of the current waveform, the better the pulse discharge effect. During the process of generating a plasma by a copper wire, the plasma channel has certain electrical resistance. The experimental results are basically consistent with the model numerical calculation results.

Key words: wire explosion; high voltage pulse discharge; plasma; broken rock; discharge model

0 引言

在隧道开挖、矿山开采等基础工程建设中,岩石爆破技术发挥着重要作用。随着工程难度的增加以及对环境方面的要求,传统的炸药碎岩技术在应用中受到很大制约。机械胀裂法在遇到硬脆性岩体时

施工进度会大大降低,而且机械式工具比较容易磨损,施工工人使用劳动强度大。其他碎岩技术如热力碎岩,水力碎岩,微波碎岩等,还处于实验室研究阶段,要实现工程应用尚需时日。等离子体碎岩技术^[1-2]具有无污染,破碎过程中无飞石、无有害气体

收稿日期:2019-05-16 DOI:10.12143/j.tkgc.2019.11.001

作者简介:马瑞,男,汉族,1975年生,高级工程师,博士,主要从事隧道开挖、路桥建设工程及其道路施工等方面的研究工作。

通信作者:薛启龙,男,汉族,1983年生,副教授,博士生导师,博士,从事井下工具、岩土钻掘、岩石爆破方面的教学与研究工作,北京市海淀区学院路29号,xql@cugb.edu.cn。

引用格式: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.

的产生,使用方便,作业效率高,是替代炸药碎岩的最有效可行的方法。液电等离子体理论在纳米材料制备、污水处理、石油天然气钻井,医疗碎石、液电加工成型等方面都有广泛应用。然而将其用于工程上的大型岩石破碎^[3-8],此方面的研究还较少。

高压脉冲放电时采用电爆丝引弧,水中放电是主要方式,电爆丝脉冲放电以其复杂的高能物理过程,并伴有产生的稠密等离子体、强紫外光、强氧化性自由基和强冲击波等多种效应,成为目前研究的热点^[9-10]。然而对于水中丝爆的放电过程,其机理尚不是完全清楚,本文研究了水中丝爆产生等离子体继而破碎岩石的机理,分析了高电压脉冲放电过程中的铜丝融化过程,建立了铜丝在各阶段变化的电阻模型,利用 MATLAB 对不同阶段放电电路的电流进行了数值仿真分析,并与实验得到的电流波形进行对比。研究发现,电流波形,上升沿时间越短,脉冲放电效果越好。铜丝变化产生等离子体的过程中,等离子体通道具有一定的电阻性。实验数据结果与模型数值计算结果基本相符。

1 水中丝爆脉冲放电电路模型

为研究丝爆放电等离子体的形成机理,本文引入分段式电阻模型,数值求解放电过程中的电流变化。电路模型中,设定储能电容器最高放电电压为 40 kV,放电周期为 2000 μ s,回路电感与电阻分别为 2.1 μ H 和 0.5 Ω 。电路模型如图 1 所示,图中 R 代表铜丝的电阻,不同实验设置可以通过调整高低放电电极之间的铜丝距离,电阻值也随铜丝的尺寸发生变化。

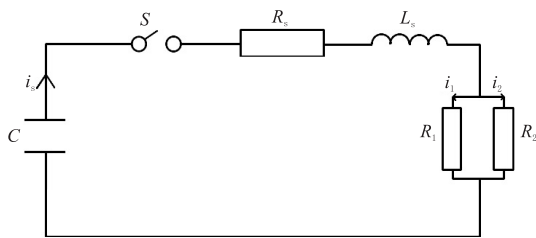


图 1 水中丝爆脉冲放电电路模型

Fig.1 Pulse discharge circuit model of underwater wire explosion

放电过程中电爆丝将经历 5 个变化阶段。

第一阶段中,电爆丝从固态升温到熔点的过程,持续时间短,电爆丝温度低,不考虑这个过程其他能量的损失,即电容器释放的能量全部转换成焦耳热作用于电阻上。

第二阶段中,即电爆丝开始发生熔解,电路中的电阻部分由固态与液态两种金属电阻组成,在电路中可以理解为两种状态的金属电阻并联在电路中,等效电路如图 1 所示。

第三阶段电路中电阻的形式本质上与第一阶段相似,液态电爆丝吸收热量达到沸点。

第四阶段中,电阻丝剧烈汽化产生电爆炸,该阶段等效电路类似于图 1 的双电阻模型,电路中电爆丝电阻存在气态电阻与液态电阻,只是该过程中气态电阻相当于无穷大。

第五阶段,是气相金属电阻与等离子体状态并存,并逐渐变为绝缘状态。即电爆丝从加热到完全断开可用 3 个不同的数学模型来描述,即电阻线性化模型、双电阻模型、弧道模型^[1,3-4,7]。

2 水中丝爆脉冲放电过程机理分析

结合上文中的电路模型,对放电回路电爆丝在电路中的变化过程分 5 个过程,每个过程中放电回路分别对应相关电阻模型。通过分析各阶段电路,根据基尔霍夫定律和电阻数学模型联系建立数学方程。为便于理论计算忽略开关等电阻对电路的影响。

2.1 电爆丝固态加热段方程

电爆丝受热发生变化的第一个物理过程,金属电爆丝在电流产生的焦耳热作用下自身发生固态加热过程。 C_s 表示电路的储能电容, L_s 为回路电感, R_s 为电路电阻。

由基尔霍夫定律和电阻模型可得如下微分方程组^[22,25]:

$$\begin{cases} L_s \frac{di}{dt} + R_s i + R_1 i = U_{cs}(0) - \frac{1}{C_s} \int i dt & (0 \leq t \leq t_1) \\ \frac{dR_1}{dt} = \frac{\alpha_1 R_{10}}{m_0 C_v} i^2 R_1 \end{cases} \quad (1)$$

当 $t=0$ 时,表示电容放电的初始时刻, $t=t_1$ 表示电路中电爆丝加热到熔点的时间点,上述方程组时间范围为 $0 \leq t \leq t_1$,方程的初始条件($t=0$)为: $R_1=R_0$ (电阻丝初始时刻电阻), $i_0=0$, U_{cs} 为放电电容初始放电电压值。

2.2 电爆丝液化阶段方程

第二个阶段为电爆丝的液化阶段,该过程电爆丝达到熔点,开始进行熔化过程。由于该过程的变化时间较短所以在此过程中可以看成电爆丝发生恒

温熔化变化过程。模型如式(2)所示, R_1 和 R_2 分别表示电爆丝的固态电阻与液态电阻, 电爆丝液态电阻 R_2 由于开始熔解时的电阻相当大, 代入方程组中不易计算, 所以这一阶段将电介质的电阻 R_a 作为液态电阻 R_2 的初始值^[2,5,8]。

根据基尔霍夫定律、节点电路方程以及与该过程建立的电阻模型可得如下微分方程组^[25,27]:

$$\begin{cases} L_s \frac{di}{dt} + R_s i_s + R_1 i_1 = U_{cs}(t_1) - \frac{1}{C_s} \int i_s dt \\ \frac{di_1}{dt} = \frac{-\sigma_m i_1 R_1}{w_m \rho_m l^2} (i_1^2 R_1 + i_2^2 R_2) \\ \frac{di_2}{dt} = \frac{-\sigma_m i_2 R_2}{w_m \rho_m l^2} (i_1^2 R_1 + i_2^2 R_2) \\ \frac{dR_1}{dt} = \frac{\sigma_m R_1^2}{w_m \rho_m l^2} (i_1^2 R_1 + i_2^2 R_2) \\ \frac{dR_2}{dt} = \frac{\sigma_m R_2^2}{w_m \rho_m l^2} (i_1^2 R_1 + i_2^2 R_2) \end{cases} \quad (2)$$

该过程中的初始时刻为电爆丝加热过程完全熔解的终止时间 t_1 , $t=t_2$ 表示该过程终止时间, 即电爆丝转化为液态状态。 $t_1 \leq t \leq t_2$ 为上述过程的时间范围。方程组的初始条件为: $i_s(t_1^+) = i_s(t_1^-)$; $i_1(t_1^+) = i_1(t_1^-)$; $i_2(t_1) = 0$; $R_1(t_1^+) = R_1(t_1^-)$; $R_2(t_1) = R_a$; $U_{cs}(t_1^+) = U_{cs}(t_1^-)$ 。

2.3 电爆丝液态加热段方程

第三个阶段为电爆丝液态加热阶段, 该阶段为电爆丝熔化阶段结束, 液态电爆丝继续在电流的作用下持续加热, 该变化过程与电爆丝变化的第一个过程相似。

根据基尔霍夫定律、节点电路方程以及与该过程建立的电阻模型可得如下微分方程组:

$$\begin{cases} L_s \frac{di}{dt} + R_s i + R_1 i = U_{cs}(0) - \frac{1}{C_s} \int i dt \\ \frac{dR_2}{dt} = \frac{\alpha_2 R_{20}}{m_0 C_v} i_2^2 R_2 \\ \frac{di_2}{dt} = \frac{-\alpha_2 R_{20}}{m_0 C_v} i_2^3 \end{cases} \quad (3)$$

该过程中的初始时刻为电爆丝加热至沸点的终止时间 t_2 , $t=t_3$ 表示该过程终止时间, 即电爆丝转化为液态状态。 $t_2 \leq t \leq t_3$ 为上述过程的时间范围。方程组的初始条件为上一过程重点附近的值: $i_s(t_2^+) = i_s(t_2^-)$; $i_2(t_2^+) = i_2(t_2^-) = i_s(t_2^+)$; $R_2(t_2^+) = R_2(t_2^-) = R_{20}$; $U_{cs}(t_2^+) = U_{cs}$

(t_2^-) ^[22,25,27]。

2.4 电爆丝气化阶段方程

第四个阶段为电爆丝的气化过程, 该阶段过程中电爆丝发生剧烈的气化现象, 发生爆炸作用, 开始产生高能等离子体, 对电介质、岩石产生巨大的冲击力。该过程的变化原理相似于电爆丝第二个变化阶段, 即液态金属 R_2 和气态金属 R_3 的双电阻模型, 该阶段开始时由于气态电爆丝的电阻阻值相当于无穷大, 但电介质的电阻作用, R_3 不能以无穷大代入运算, 所以在这一阶段将水介质电阻 R_a 作为的气态电阻 R_3 初始值进行考虑^[9-10,23]。

根据基尔霍夫定律、节点电路方程以及与该过程建立的电阻模型可得如下微分方程组^[25,27]:

$$\begin{cases} i_s = i_2 + i_3 \\ L_s \frac{di_s}{dt} + R_s i_s + R_2 i_2 = U_{cs}(t_3) - \frac{1}{C_s} \int i_s dt \\ \frac{di_2}{dt} = \frac{-\sigma_v}{w_v \rho_v l^2} i_2^3 R_2^2 \\ \frac{di_3}{dt} = \frac{k_0}{w_v l^2} i_2^2 i_3 R_2 R_3 \\ \frac{dR_2}{dt} = \frac{\sigma_v}{w_v \rho_v l^2} i_2^2 R_2^3 \\ \frac{dR_3}{dt} = \frac{-k_0}{w_v l^2} i_2^2 R_2 R_3^2 \end{cases} \quad (4)$$

用 t_4 表示电爆丝完全气化的时刻, 该过程的作用时间为 $t_3 \leq t \leq t_4$ 。该过程的初始时 $t=t_3$ 初始值由上一阶段终止时的值来确定。

2.5 电爆丝熄灭阶段方程

第五个阶段为电爆丝的熄灭阶段, 这一过程为电爆丝金属蒸汽电阻作用, 其电阻使用弧道模型表示。

根据电路等效图可以列出如下方程:

$$\begin{cases} L_s \frac{di_s}{dt} + R_s i_s + R_3 i_3 = U_{cs}(t_4) - \frac{1}{C_s} \int i_s dt \\ \frac{di_3}{dt} = -\left(\frac{1}{\theta} + \frac{e^{-t/\theta}}{R_{30} C_a}\right) i_3 + \frac{e^{-t/\theta}}{R_{30} C_a} i_s \\ \frac{dR_3}{dt} = \frac{d[R_{30} \exp(t/\theta)]}{dt} \end{cases} \quad (5)$$

本阶段初始条件为: $i_3 = i_s$; $i_s(t_4^+) = i_s(t_4^-)$; $i_3(t_4^+) = i_3(t_4^-)$; $R_{30} = R_3(t_4)$; $U_{cs}(t_4) = U_{cs}(t_4^+) = U_{cs}(t_4^-)$

针对上文推导出来的各个阶段电路元件电阻与基尔霍夫定律推导出的微分方程组, 进行数值求解。用 MATLAB 软件进行数值模拟分析, 选取合理的

物理量参数,根据实验设计对放电电压、电容量、电爆丝电阻等参数的设置,可得到相应的计算结果。

3 放电回路影响因素分析

通过 MATLAB 对放电过程的各个阶段所建立的模型进行数值计算,针对各个放电阶段微分方程组,以各个阶段电爆丝所需的物理量为判断标准,通过电爆丝在放电过程自身温度随时间变化为判断不同阶段起始时间:

$$T(t) = \int_0^t \frac{i^2 R_f}{C_0 \rho S l} dt + t_0 \quad (6)$$

式中: R_f 、 C_0 ——分别为电爆丝的电阻和比热; ρ 、 S 、 l ——分别代表电爆丝的密度、横截面积和有效长度; t_0 ——加热前电爆丝初始绝对温度^[4,23]。

在模拟计算中,改变回路电阻、电感、爆丝等参数,计算分析上述参数的变化对脉冲电流的影响。模型中设定回路电阻为 0.4Ω ,电介质等效电阻为 0.01Ω ,回路电感为 $2 \mu\text{H}$,电介质等效电阻为 0.1Ω ^[17,21]。

3.1 回路电感的影响

结果如图 2 所示,回路电感的变化对放电电流的影响,选取回路中各参数为: $U_{cs} = 20 \text{ kV}$, $C_s = 1280 \mu\text{F}$, $R_s = 0.3 \Omega$, $L_s = 0.5, 5, 20 \mu\text{H}$ 。电爆丝尺寸为 $d = 1.1 \text{ mm}$, $l = 30 \text{ mm}$ 。从图 2 可知,放电回路电感值越小,波头时间愈短,电流上升沿越陡。当回路增加一个数量级的电感,回路电流降低的较明显。回路电感对脉冲电流影响较大,故在系统装置设计与构建中尽量降低回路电感^[24,26]。

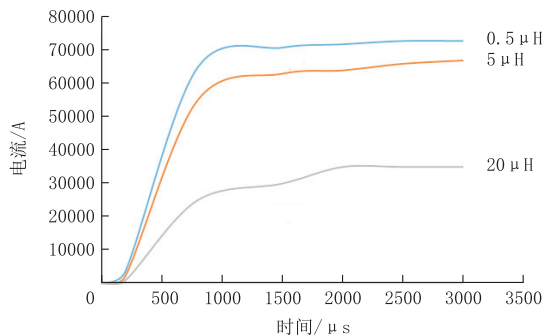


图 2 回路电感对脉冲电流上升沿的影响

Fig.2 Effect of the loop inductance on the rising edge of the pulse current

3.2 回路电阻的影响

如图 3 所示,反映了脉冲放电过程中回路电阻对电流波形的影响,脉冲放电回路中各参数同上,回路电阻 R_s 取值分别为 $0.4, 4, 40 \Omega$ 。由图 3 计算结果可见,电流的峰值受回路电阻影响较明显,当电阻

变化时,随着回路电阻的增加,电流发生了较大的变化,回路电阻越大对应脉冲电流的幅值越小。因此,在设备安装及设计过程中,尽量减少回路电阻。

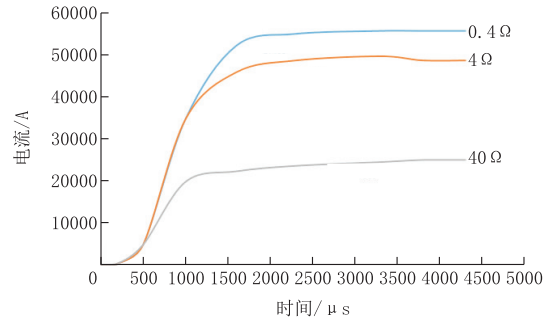


图 3 回路电阻对脉冲电流的影响

Fig.3 Effect of the loop resistance on the pulse current

3.3 电爆丝物理性质的影响

电爆丝的不同物理特性也会影响电路的放电效果,其物理性质主要指材料的密度、电导率、比热等,表 1 列出了 3 种金属 Cu、Fe 和 Al^[4,16] 的材料物理特性。

表 1 电爆丝物理特性

Table 1 Physical properties of the electric explosion wire

金属	密度/ $[(10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3})]$	电导率/ $[\text{m} \cdot (\Omega \cdot \text{mm}^2)^{-1}]$	比热/ $[(10^3 \text{ J}) \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}]$	电阻温度系数/ $^{\circ}\text{C}^{-1}$
Cu	8.96	1/0.0168	0.385	0.00430
Fe	7.87	1/0.0970	0.460	0.00600
Al	2.70	1/0.0264	0.900	0.00423

上述几种电爆丝在几何尺寸一致的情况下,对 Cu、Fe 和 Al 不同金属材质的电爆丝进行数值仿真分析,电路回路相关参数同上。如图 4 所示,铜丝爆时电流的幅值较大,铝和铁电爆丝脉冲电流幅值分别为铜电爆丝幅值的 85% 和 70%。考虑成本、放电效果等因素,显然选用铜丝作为电爆丝较为合理。

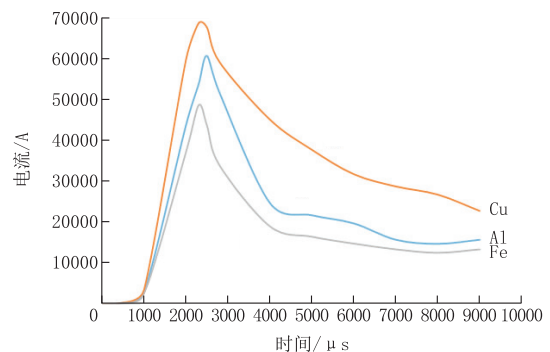


图 4 电爆丝物理特性对脉冲电流的影响

Fig.4 Effect of physical properties of the electric explosion wire on the pulse current

4 实验结果对比分析

在研究过程中构建了用于研究水中等离子体碎岩过程的实验系统^[12,20],该系统主要由高功率脉冲设备,等离子体电极以及电介质组成。等离子体电极连接高压脉冲放电设备的高低电极连接导线,固定好岩石与等离子体电极固定架,将实验岩块放入碎岩箱体固定架下工字钢上,每次放电实验前在预钻孔中加入电介质,加入量至预钻孔孔口处,放入等离子体电极,固定好固定架,完成实验系统构建。采用单发脉冲放电方式,针对每种破碎实验岩石,放电实验次数会以岩石被炸开为终点(如图 5 所示)。记录了每次产生放电破碎的电流波形、铜丝变化情况以及岩石破碎情况。

本文研究的目的是将电爆过程中产生的较大冲击波用于岩石破碎。所以实验参数电压、电流需要较大值,才能够产生足够能量。故为验证上述放电过程机理模型的有效性,设计了 4 组实验,各组实验参数如表 2 所示。

实验过程中测量放电电路的电流变化。将实验



(a) 玄武岩 (b) 花岗岩

图 5 玄武岩和花岗岩破碎实物示意图

Fig.5 Image of broken basalt and granite

表 2 实验组参数

Table 2 Parameters of experimental sets

实验组	电压/kV	电容量/ μF	电爆丝长度/mm	电容能量/kJ
一	20	1280	25	256
二	20	1280	35	256
三	20	1280	35	256
四	15	1280	35	144

中测得的 4 组实验放电电流波形图与对应的电路电流数值计算结果进行拟合比较,结果如图 6 所示。

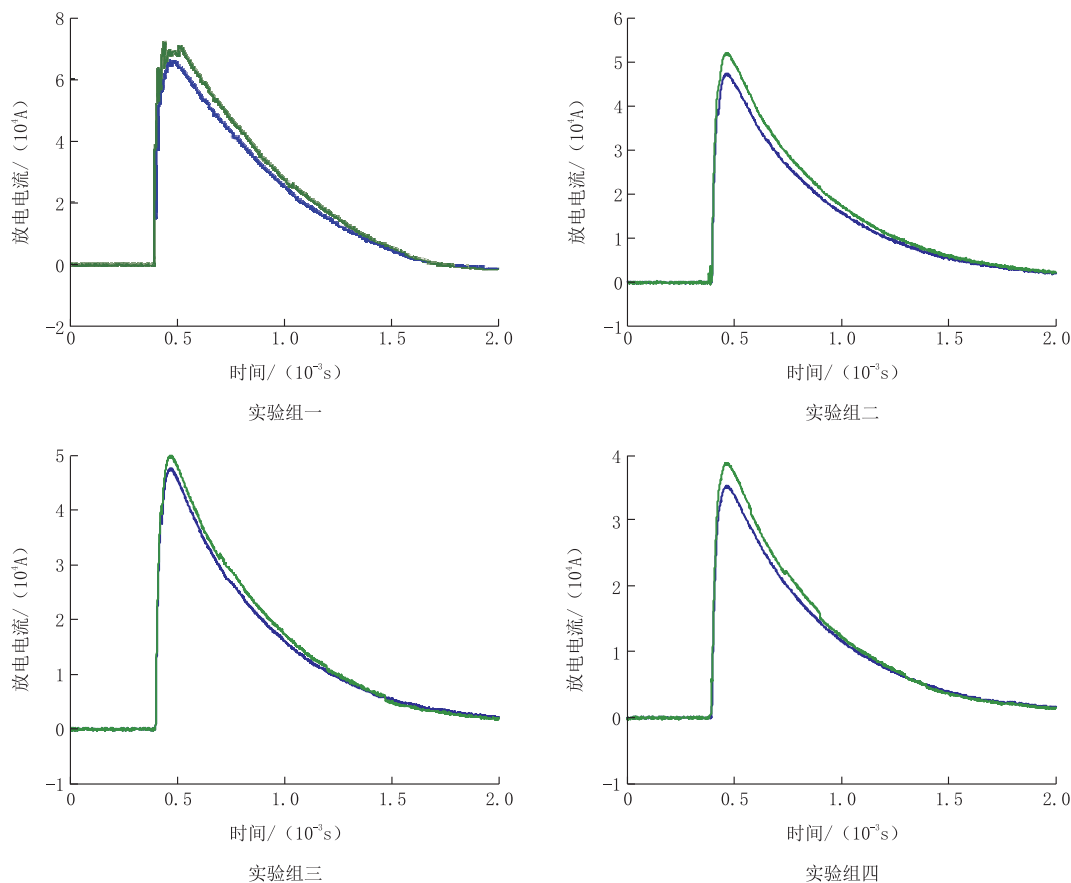


图 6 电流波形对比图

Fig.6 Comparison of current waveforms

从4组电流波形图中可知,数值计算电路中电流与实验得到的电流波形拟合度很好,误差在10%左右,说明文中建立的电路放电机理仿真模型是合理的,可以用于工程中放电参数优化与分析。

放电过程中电爆丝的变化是多个物理过程共同作用的结果,该过程存在其他物理过程,如发光、声波等对放电电流等参数也有一定的影响,仍需进一步进行探究。在理论计算过程中参数的选取对电流理论计算影响较大,不同参数选择可能导致电路产生欠阻尼,过阻尼,临界阻尼现象,导致脉冲电流的波动较为明显。

5 总结

本文基于水中电爆丝分段电阻模型结合各阶段电路的基尔霍夫定律与节点电流公式计算出电流变化过程,对电爆丝电阻变化过程进行了数学描述。通过对比数值计算结果与实验数据,一定程度上验证了模型的正确性。

该模型考虑了电爆丝周围电介质水在放电过程中产生的电阻效应,通过多种电阻变化模型,可以验证本实验过程中电爆丝在高压脉冲作用下的变化过程以及对放电回路电流的影响;波尾后期脉冲电流的变化情况,一定程度解释了高压脉冲在空气中形成的等离子体通道是无阻态的,而在液体中放电形成的等离子体通道是具有一定阻性的。

电爆丝在放电过程中是多物理量变化的过程,该模型中忽略了等离子体作用过程中例如热动力学,光学,电磁学等物理变化过程对实验结果造成的误差影响,需要进一步深入研究该阶段发生的物理过程,完善模型。

放电回路导线、测量元件等产生的阻抗会影响由于无法准确测定所以在放电过程中实际测量电流波形与理论计算电流波形有一定的误差。储能电容器,放电路径产生的电感,放电开关电阻等电气元件在放电过程中都会产生一定的阻抗,造成理论值比实际值高。

参考文献(References):

[1] 孙冰.液相放电等离子体及其应用[M].北京:科学出版社,2013:8-12.
SUN Bing. Discharge plasma in liquid and its application[M]. Beijing: Science Press, 2013: 8-12.

[2] Zhou Q, Zhang Q G, Zhang J, et al. Effect of circuit parame-

ters and wire properties on exploding a copper wire in water[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2011, 39(7):1606-1612.

[3] 杨汉武,钟辉煌.PSpice模型用于电爆炸丝的数值模拟[J].国防科技大学学报,2000,22(S1):38-42.
YANG Hanwu, ZHONG Huihuang. Numerical simulation of electric exploding wires via PSpice models[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2000, 22(S1): 38-42.

[4] 张春喜.水中丝爆引发的推进效应[D].哈尔滨:哈尔滨理工大学,2005.
ZHANG Chunxi. The propulsion effect caused by exploding wire in water[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2005.

[5] 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(6):56-62.
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(6): 56-62.

[6] 黄国良.高压脉冲放电碎岩的研究[D].武汉:华中科技大学,2013.
HUANG Guoliang. Research on high pressure pulse discharge rock[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2013.

[7] 刘晓春,冯长根,朱祖良,等.水中高压脉冲放电的光辐射研究[J].北京理工大学学报,1999,19(1):8-12.
LIU Xiaochun, FENG Changgen, ZHU Zuliang, et al. Light radiation from pulsed discharges in water[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 1999, 19(1): 8-12.

[8] 李树杰,张毅.液电效应处理污水的实验研究[J].中国微生态学杂志,1996,8(1):63-64.
LI Shujie, ZHANG Yi. Studies on sewage treatment by electrohydraulic effect[J]. Chinese Journal of Microecology, 1996, 8(1): 63-64.

[9] 李宏达,赵红阳,王军,等.高压脉冲放电碎石法研究[J].南京理工大学学报,2015,39(6):722-726.
LI Hongda, ZHAO Hongyang, WANG Jun, et al. High voltage pulse discharge lithotripsy[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2015, 39(6): 722-726.

[10] 张校熔,庄故章,罗德强,等. SelFrag 高压脉冲矿石破碎技术研究进展[J].金属矿山,2017(3):97-101.
ZHANG Xiaorong, ZHUANG Guzhang, LUO Deqiang, et al. Research Progress of SelFrag high voltage pulse crushing technology[J]. Metal Mine, 2017(3): 97-101.

[11] 赵秉成,陈晨,房治强,等.非常规碎岩技术的研究进展[J].中国矿业,2010,19(4):87-88,112.
ZHAO Bingcheng, CHEN Chen, FANG Zhiqiang, et al. Research and development of unconventional rock fragmentation[J]. China Mining Magazine, 2010, 19(4): 87-88, 112.

[12] 陈世和,麻胜荣,邹文洁.等离子技术在矿山中的应用[J].铀矿冶,2006,25(4):173-176.
CHEN Shihe, MA Shengrong, ZOU Wenjie. Application of plasma technology in mines[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2006, 25(4): 173-176.

- [13] 李显靖.电脉冲等离子爆破[J].国外金属矿山,1993(10):120.
LI Xianjing. Electric pulse plasma blasting[J]. Foreign Metal Mines, 1993 (10):120.
- [14] 张永民,邱爱慈,周海滨,等.面向化石能源开发的电爆炸冲击波技术研究进展[J].高电压技术,2016,42(4):1009-1017.
ZHANG Yongmin, QIU Aici, ZHOU Haibin, et al. Research progress in electrical explosion shockwave technology for developing fossil energy[J]. High Voltage Engineering, 2016,42(4):1009-1017.
- [15] 晁攸闯,韩若愚,李兴文,等.水中电爆炸放电通道特性 0 维数值模拟[J].高电压技术,2014,40(10):3112-3118.
CHAO Youchuang, HAN Ruoyu, LI Xingwen, et al. Zero-dimensional simulation of discharge channel properties during underwater electrical wire explosion[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(10):3112-3118.
- [16] 周庆,张乔根,张俊,等.介质对铜丝电爆炸沉积能量的影响[J].高电压技术,2011,37(2):369-374.
ZHOU Qing, ZHANG Qiaogen, ZHANG Jun, et al. Effect of medium on deposited energy in electrical wire explosion[J]. High Voltage Engineering, 2011,37(2):369-374.
- [17] 张雷,邓琦林,周锦进.液电效应除垢机理分析与试验研究[J].大连理工大学学报,1998(2):87-91.
ZHANG Lei, DENG Qilin, ZHOU Jinjin. Experimental study of shock wave effect of electrical discharge under water in filth cleaning[J]. Journal of Dalian University of Technology, 1998(2):87-91.
- [18] 屈丹安,王锡林.井下电脉冲解堵增产设备[J].天然气工业,1997(5):88.
QU Danan, WANG Xilin. Downhole electric pulse deblocking and stimulation equipment[J]. Natural Gas Industry, 1997 (5): 88.
- [19] 孙凤举,曾正中,邱毓昌,等.一种用于油水井解堵的脉冲大电流源[J].高电压技术,1999,25(2):47-49.
SUN Fengju, ZENG Zhengzhong, QIU Yuchang et al. Pulse high current power supply used for dredging oil & water wells[J]. High Voltage Engineering, 1999,25(2):47-49.
- [20] 邓琦林,刘宏军,张雷,等.液电成形的实验研究[J].模具工业,1998,20(6):46-49.
DENG Qilin, LIU Hongjun, ZHANG Lei, et al. Experimental study on liquid electroforming[J]. Die & Mould Industry, 1998, 20(6):46-49.
- [21] E. M. Honing. Generation of a 750MV 5 kHz pluse train from an inductive energy store[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 1984,12(1):24-27.
- [22] M. J. Taylor. Formation of plasma around wire fragments created by electrically exploded copper wire[J]. Journal of Physics, 2002,35(7):700-709.
- [23] Kim, Jin-Gi. On the resistance modeling of the fuse opening switches after onset of explosion[D]. Texas Tech University, 2002:60-75.
- [24] S. I. Tkachenko, N. I. Kuskova. Dynamics of Phase Transition at Electrical Explosion of Wire[J]. Journal of Physics: Condensed Matter, 1999,11:2223-2232.
- [25] L. Vermij. The voltage across a fuse during the current interruption process[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 1980,8(4):460-468.
- [26] G. I. Dolgachev, L. P. Zakatov. Study of Repetitive Plasma Opening Switch Generator Technology. IEEE Transactions on Plasma Science, 1998,26(5):1410M419.
- [27] 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):1-6.

(编辑 王建华)