

LCR 触发多级多通道火花开关的设计及其性能分析

章志成^{1,2}, 章旭明¹, 郑超^{1,2}, 邓官垒¹, 闫克平^{1,2}, 刘振^{1,2}

(1. 浙江大学生物物质化工教育部重点实验室, 杭州 310028; 2. 浙江大学化工系, 杭州 310028)

摘要: 为了进行电粉碎岩石和等离子体灭菌的实验研究, 研制了一种 LCR 触发多级多通道火花开关。采用 μs 上升前沿的初级脉冲充电电源对低电感陶瓷电容充电, 以火花开关作为短脉冲形成开关。在 $600\ \Omega$ 负载电阻下, 测试了火花开关的工作性能。利用脉冲电源开展水中灭菌实验, 考察了开关的工作性能。实验发现: 当气体间隙总长为 $14\ \text{mm}$ 时, 开关的导通电压范围为 $29\sim 45\ \text{kV}$ 。当火花开关的工作电压为 $34\ \text{kV}$ 时, 火花开关平均导通时延和抖动分别为 $115\ \mu\text{s}$ 和 $71\ \mu\text{s}$; 负载上峰值功率为 $1.776\ \text{MW}$; 电阻上获得的电压波形基本一致, 电压幅值在 $33.4\sim 34\ \text{kV}$ 范围内, 电压的上升时间范围为 $23\sim 28\ \text{ns}$; 开关的能量损耗为 8% , 其中触发电路引起的能量损耗为 2.163% 。火花开关在累计工作 2.5 万次后, 电极烧蚀均匀, 厚度无变化。火花开关分别在有、无 LCR 触发电路情况下连续运行 20 次的对比实验证明, LCR 触发方法能够显著提高多级多通道的火花开关工作的稳定性。

关键词: LCR; 触发; 多级多通道; 火花开关; 触发时延; 抖动; 能量损耗; 电极烧蚀

DOI: 10.3969/j.issn.1003-6520.2013.04.024

文章编号: 1003-6520(2013)04-0928-09

Design and Performance Analysis of Multi-gap Multi-channel Spark Switch with LCR Triggered Method

ZHANG Zhicheng^{1,2}, ZHANG Xuming¹, ZHENG Chao^{1,2}, DENG Guanlei¹, YAN Keping^{1,2}, LIU Zhen^{1,2}

(1. Key Laboratory of Biomass Chemical Engineering, Ministry of Education, Zhejiang University, Hangzhou 310028, China;

2. Department of Chemical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310028, China)

Abstract: In order to experimentally research electrical fragmentation of rocks and plasma sterilization, we developed an LCR-triggered, multi-gap, and multi-channel switch. The short pulsed forming switch was formed by the spark switch, of which a group of ceramic capacitors of low inductance in coaxial configuration was charged by a μs primary pulsed power supply. The switch performance was tested with a resistor of $600\ \Omega$, and was further tested by an experiment of sterilization which adopted a pulse power supply. Experimental results showed that the switch had switch-on voltage in range of $29\sim 45\ \text{kV}$ while its total gap distance was $14\ \text{mm}$; when the operating voltage was $34\ \text{kV}$, the averaged switch-on time delay and jittering time were $115\ \mu\text{s}$ and $71\ \mu\text{s}$, respectively. In the test with the resistor, the peak power on the resistor was $1.776\ \text{MW}$, and the range of amplitude and the rise time of the output voltages on the resistor were $33.4\sim 34\ \text{kV}$ and $23\sim 28\ \text{ns}$, respectively. The total switch energy loss was 8% , and the energy loss on triggered circuit was 2.163% . After 2.5×10^4 shots of switching, the electrode erosion was uniform, and the lengths of the electrodes were unchanged. The output amplitude voltages on the load of continuous 20 times of switching of the spark switch in the presence and absence of LCR triggered circuits were examined. The results show that adopting the LCR triggered circuit has greatly improved the switching stability of the spark switch.

Key words: LCR; triggered; multi-gap multi-channel; spark switch; triggered delay time; jittering; energy loss; electrode erosion

0 引言

火花开关因具有导通电压高、耐受电流大和结构简单等特点, 在脉冲功率系统中得到了广泛的应用^[1-5]。火花开关按导通方式的不同可以分为自击穿火花开关和外加触发装置的开关。由于气隙击穿本身存在着分散性, 因而绝大部分火花开关采用外

加触发装置来提高火花开关工作的稳定性。一般的触发方式是通过外部的脉冲电源来改变触发电极上的电位, 引起气隙的过压击穿导通, 或者通过激光辐照、电子束注入等方式引入气隙击穿的初始电子^[1,6-8]。闫克平等人提出了利用 LCR 触发的方式实现火花开关的过压导通, 该方法无需外设单独的触发电源, 仅利用简单的电感、电容和电阻组成的电路实现对电路的触发, 具有结构简单、工作可靠等优点^[9-11]。

在火花开关的设计方面, 两电极气体火花开关的电极通常设计成半球形, 当开关阴、阳极间的电压

基金资助项目: 国家高技术研究发展计划(863计划)(2007AA09Z321)。

Project supported by National High-tech Research and Development Program of China(863 Program)(2007AA09Z321).

差达到气隙的击穿电压时,开关导通。这种结构存在的最大问题是烧蚀严重,并存在较大的抖动^[12-13]。在开关主间隙间增设一定数量的中间电极,这种结构的电场比单间隙火花开关的电场更为均匀,提高了开关的工作电压。中间电极的加入使火花开关具有多个火花间隙,当某一个间隙击穿后,电场会重新分布,其它间隙在越来越高的过电压下击穿,直到最后一个间隙导通,开关导通,从而提高开关输出的电压上升前沿,减少开关的抖动时间^[14-18]。研究表明:多级多通道气体火花开关由于后续开关间隙存在过电压击穿,易于形成多通道放电,因此能够显著减小开关的火花电感^[19-22]。

结合火花开关 LCR 触发方法和多级多通道结构的特点,本文自行研制了一台 LCR 触发的多级多通道火花开关,该开关的电极间隙可调,具有较宽的电压工作范围。利用 μs 上升前沿的脉冲电源对低电感的陶瓷电容充电,采用火花开关作为短脉冲形成开关,在 $600\ \Omega$ 负载电阻下测试了火花开关的工作性能,并利用基于该火花开关的电源系统开展了水中灭菌的实验研究。

1 LCR 触发原理

结合图 1 所示的电路对 LCR 触发原理^[23] 予以说明。主回路主要由谐振充电电源(C_L 和 L_1 , 其中 C_L 为初级储能电容, L_1 为等效脉冲变压器)、整流管 D、高压充电电容 C_h 、火花开关 S 和负载 Z 组成。触发回路为图 1 中的虚线框部分,主要由触发电感 L、触发电容 C 和触发电阻 R 组成。触发电阻 R 的高压端分别与火花开关 S 的触发电极和触发电容 C 的低压端电连接,触发电阻 R 的低压端接地。

在 LCR 触发回路中,触发电感 L 的作用是保护触发电容 C 免受过流冲击,其值较小,一般为几十 μH 。触发电阻 R 和触发电容 C 应满足的条件分别为:

$$R \gg 2\sqrt{\frac{L}{C}}; \quad (1)$$

$$C \ll C_h. \quad (2)$$

谐振充电电源给高压充电电容 C_h 和触发电容 C 同时充电。在式(1)的条件下,触发回路中的触发电阻 R 较大,一般为数百 $\text{k}\Omega$ 到几个 $\text{M}\Omega$;在式(2)的条件下,可以忽略 LCR 触发支路对高压充电电容 C_h 充电过程的影响,将谐振电路给高压充电电容 C_h 的充电过程等效为图 2(a)所示的电路。假设谐振充电电源的充电频率为 ω ,则在充电的过程中($0 \leq \omega t \leq \pi$),高压充电电容 C_h 高压端上的电位(即火花开关

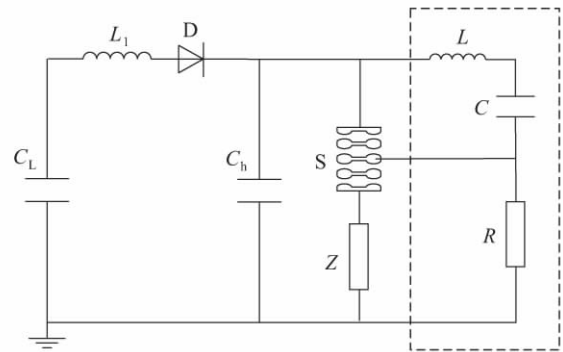


图 1 LCR 触发电路示意图

Fig. 1 Schematic diagram of LCR triggered circuit

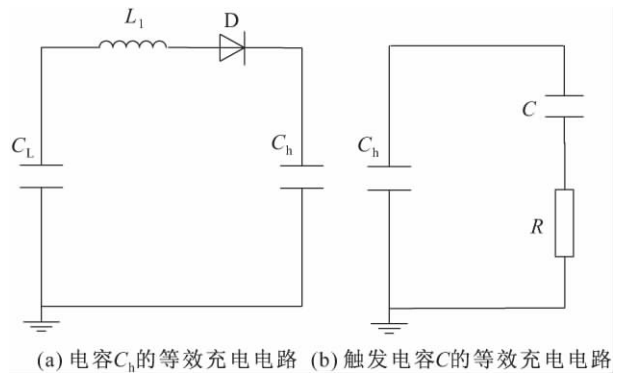


图 2 高压充电电容 C_h 和触发电容 C 等效的充电电路

Fig. 2 Equivalent charging circuits of the high voltage capacitor C_h and the triggered capacitor C

阳极上的电位) V_1 为

$$V_1 = \frac{U_{\max}}{2}(1 - \cos(\omega t)). \quad (3)$$

式中: U_{\max} 为谐振充电电源提供的最大充电电压; t 为充电时间。

在式(1)和式(2)所示条件下,触发回路中触发电容 C 的充电过程可以等效为图 2(b)所示的电路。由于触发电感 L 很小,对充电过程影响不大,因此为简化电路分析,忽略触发电感 L。在谐振充电电源给触发电容 C 充电的过程中($0 \leq \omega t \leq \pi$),触发电阻高压端上的电位(即火花开关触发极上的电位) V_2 为

$$V_2 = \frac{U_{\max}}{2} \frac{\omega \tau}{1 + (\omega \tau)^2} (\omega \tau \exp(-\frac{t}{\tau}) - \omega \tau \cos \omega t + \sin \omega t). \quad (4)$$

式中 τ 为 LCR 触发回路的时间常数, $\tau = RC$ 。

当高压充电电容 C_h 的充电过程完成后($\omega t > \pi$),触发电容 C 上的电压仍低于高压充电电容 C_h 的电压,高压充电电容 C_h 进一步对触发电容 C 充电。在式(2)的条件下,高压充电电容 C_h 上的电压几乎

保持不变。则有:

$$V_1 = U_{\max}; \quad (5)$$

$$V_2 = \frac{U_{\max}}{2} \frac{(\omega\tau)^2}{1 + (\omega\tau)^2} (\exp(-\frac{\pi}{\omega\tau}) + 1) \cdot \exp(-\frac{t - \pi/\omega}{\tau}). \quad (6)$$

V_1 和 V_2 的差值即为加载在火花开关阳极和触发极上气体间隙的电压。由式(5)和式(6)可知,当高压充电电容 C_h 的充电过程完成后($\omega t > \pi$),火花开关的阳极与触发极上的电位差逐渐增大;当电位差达到一定值后,该段的气隙发生击穿,阳极上的电位就会降落到触发极上,从而导致触发极和开关阴极之间的气体间隙发生过压击穿,火花开关完全导通。

在高压充电电容 C_h 充电完成的时刻($\omega t = \pi$),火花开关触发极上电位 V_2 与阳极上电位 V_1 的比值为

$$\beta = \frac{V_2}{V_1} \Big|_{t=\pi/\omega} = \frac{1}{2} \frac{\gamma^2}{1 + \gamma^2} (1 + \exp(-\frac{\pi}{\gamma})). \quad (7)$$

式中 γ 为 LCR 触发火花开关的时间系数, $\gamma = \omega\tau$ 。图 3 给出了 γ 和 β 之间的关系。 β 值一般是根据电极位置来进行选择的。当选取火花开关最中间电极作为火花开关的触发电极时, β 值一般选取为 0.5, 此时 γ 值的大小为 2.11, 即

$$RC = \frac{2.11}{\omega}. \quad (8)$$

利用式(1)、式(2)和式(8),可以对触发回路的触发参数进行选择。

2 开关的设计及其工作性能

2.1 开关的设计

本文设计的多级多通道火花开关的结构如图 4 所示,火花开关主要由阳极、绝缘板、中间电极(包括触发电极)、阴极和不锈钢筒组成。中间电极为圆饼状的铝电极,电极与电极之间通过聚四氟乙烯垫片隔开并形成一定的间隙。电极的结构支撑件为尼龙杆,尼龙杆为外螺纹杆,其外径略小于中间电极的内径,聚四氟乙烯垫片和中间电极穿套在尼龙杆上。尼龙杆的两端分别与火花开关的阳极和阴极连接件通过螺纹连接。通过调整聚四氟乙烯垫片的高度,可以改变电极间隙的大小,从而改变火花开关的工作电压。中间的一个电极为触发电极。开关的外部为不锈钢筒壁,其作用是屏蔽开关工作时产生的噪音和电磁辐射。电极的阳极和阴极与筒壁的绝缘子为环氧树脂板。

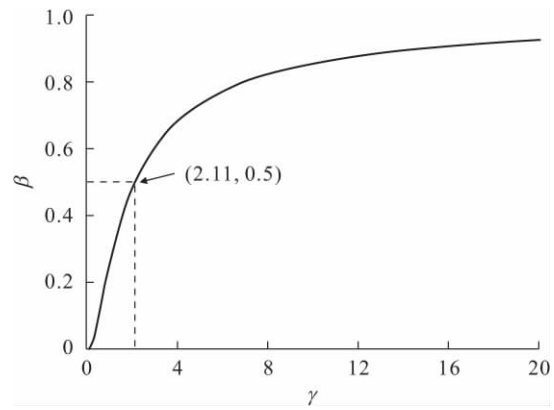


图 3 时间系数 γ 与电位比值 β 之间的关系

Fig. 3 Relationship of time coefficient γ and voltage ratio β

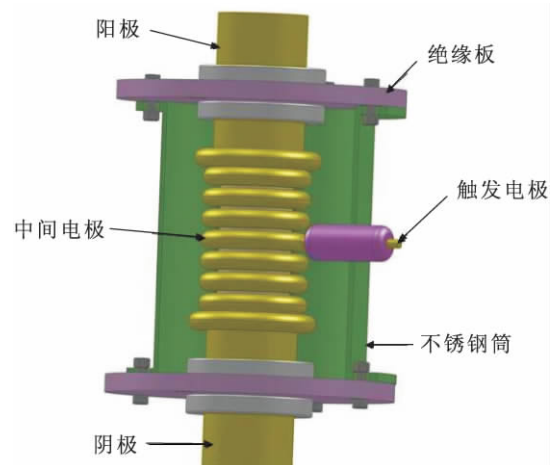


图 4 火花开关 3D 结构示意图

Fig. 4 3D model of spark gap switch

火花开关工作在常压下,气体间隙在 6~22 mm 范围内可调。由于该类型的火花开关为短脉冲形成开关,因此将火花开关与高压充电电容 C_h 设置成同轴结构,以减少火花开关的电感。在本实验装置中,高压充电电容 C_h 为低电感的陶瓷电容,由 8 组脉冲电容器单元并联组成,每个电容器单元由 3 个电容值为 5.6 nF 的电容器串联组成。高压充电电容 C_h 等效的总电容为 14.93 nF。

触发元件放置于不锈钢筒的外侧。带有绝缘外套的金属连接杆将火花开关最中间的电极和触发电阻 R 的高压端电连接,火花开关最中间的电极即为火花开关的主电极,也是火花开关的触发电极, $\beta = 0.5$ 。触发回路的参数需要考虑到谐振充电电源的频率后才能确定。

2.2 火花开关的工作性能

2.2.1 测试装置

火花开关的工作性能主要包括开关的工作电

压、工作频率、击穿时延和抖动、能量损耗和电极烧蚀等方面。本文采用如图 5 所示的电路测试装置对 LCR 触发的多级多通道火花开关 S 进行了性能测试。

初级脉冲充电电源 P(谐振充电电源)的电路结构如图 5 中实线框所示。图 5 中, L_2 和 C_1 为谐振电感和电容;工频交流电经整流后由滤波电容 C_0 滤波;控制回路采用设定的充电重复频率和充电电压控制逆变器 I_n 的工作;交流电压经变压器 T_{r1} 初步升压后对低压电容 C_L 进行充电,当电压达到设定值后,充电停止,控制电路发出信号触发晶闸管 T_h 开通, C_L 通过高压脉冲变压器 T_{r2} 将能量耦合到高压充电电容 C_h 上。二极管 D_1 和 D_2 为保护硅堆,能够减少负载在强放电情况下对初级脉冲充电电源 P 的冲击。

本装置中高压脉冲变压器的变比 n 为 40:1, $C_L = 24 \mu\text{F}$, $C_h = 14.93 \text{ nF}$, 2 者基本满足匹配关系

$$C_L = n^2 C_h. \quad (9)$$

初级脉冲充电电源的充电电压在 0~100 kV 范围内可调,充电频率在 0~30 Hz 范围内可调。在 C_L 和 C_h 匹配的情况下, C_h 的充电时间约 30 μs 。根据 LCR 触发参数的设计原则, $L = 250 \text{ nH}$, $C = 300 \text{ pF}$, $R = 330 \text{ k}\Omega$ 。

火花开关的工作性能跟工作环境(气压、空气湿度等)、 C_h 的充电速度、电路的结构参数(结构电感等)和负载等因素都有一定的关系。本文对火花开关性能的测试条件如表 1 所示。

2.2.2 工作电压范围

图 6 为火花开关 S 的阳极和触发电极上典型的电位波形。电压测试使用的是泰克 P6015 电压探头(变比 1 000:1,带宽 75 MHz),示波器为 TDS2014B。从图 6 中可以看出,在 C_h 的充电过程中,阳极上电位和触发电极上电位都是同时增大的。当 C_h 充电过程完成后,阳极上的电位基本不变,触发电极上的电位开始跌落,经过一段时间后(约 100 μs),火花间隙发生击穿。

LCR 触发火花开关的工作状态可以分为提前导通、正常导通和延后导通。通过测量火花开关 S 阳极和触发电极上的电位波形来判断开关是否处于正常的工作状态。若触发电极上的电位跌落为 0 后开关还没有导通,则触发回路失效,开关处于延后导通的状态;若在触发电极上的电位上升阶段时开关阳极上的电位就开始跌落,则开关提前导通。当气体间隙保持不变时,开关的工作电压过低,容易发生

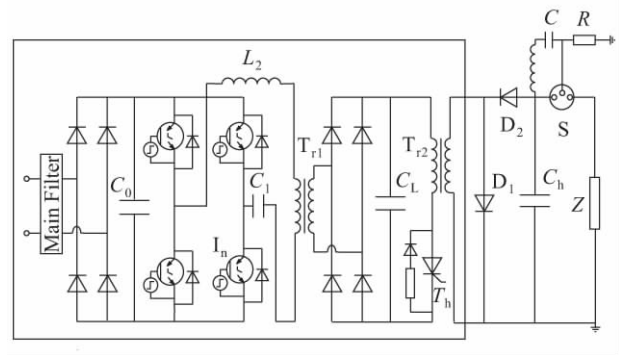


图 5 LCR 触发火花开关测试装置的电路图
Fig. 5 Electrical circuit of the testing setup of LCR triggered spark switch

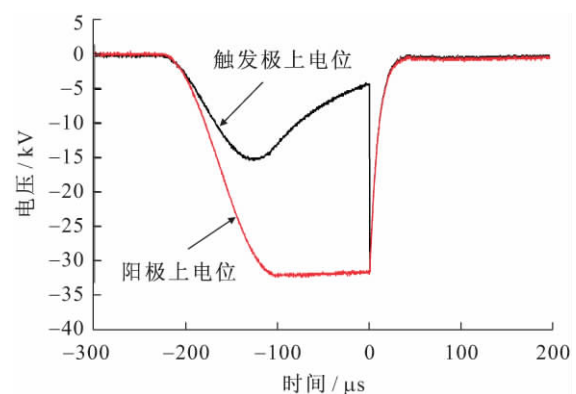


图 6 火花开关阳极和触发电极上典型的电位波形
Fig. 6 Typical voltage waveforms on the anode and the trigger electrode of the spark switch

表 1 火花开关性能测试的条件
Table 1 Test conditions of spark switch

参数	测试条件
高压电容的充电时间常数/ μs	30
空气相对湿度/%	<15
气隙总长度/mm	14
工作气压	常压
负载	600 Ω 功率电阻

延后导通的情况;而若开关的工作电压过高,则开关在充电电容充电未完成时就发生了击穿,容易出现提前导通的情况。火花开关正常导通时,开关阳极上的电位跌落应该发生在触发电极上电位开始下降的阶段。

经实验测定可得,当火花开关气体间隙为 14 mm 时,开关稳定导通的电压范围为 29~45 kV。若开关不采用 LCR 触发回路,则在相同的气体间隙下,开关自击穿的电压范围为 35~42 kV。该结果说

明了 LCR 触发方法能够提高火花开关的工作窗口。

2.2.3 击穿时延和抖动

结合图 6, 将高压充电电容上的充电电压达到 90% 至火花开关完全导通这一段时间称为开关的导通时延。图 7 为 LCR 触发火花开关在不同工作电压下的击穿时延和抖动。每个电压等级下开关的开通、关断过程连续进行 20 次。当开关的工作电压为 29 kV 时, 开关击穿时延的范围为 178~332 μs , 平均击穿时延为 250 μs ; 当开关的工作电压为 34 kV 时, 开关击穿时延的范围为 94~165 μs , 平均击穿时延为 115 μs ; 当工作电压为 42 kV 时, 开关击穿时延的范围为 24~124 μs , 开关的平均击穿时延为 51 μs 。随着工作电压的升高, 开关的平均击穿时延逐渐减小。

由图 7 可知, 开关的抖动(击穿时延的分散性)并不随着开关工作电压的上升而单调减小, 而是有一定的波动。当开关的工作电压较小时, 开关的抖动为 154 μs ; 当开关的工作电压为 34 kV 时, 开关的抖动为 71 μs ; 而当开关的工作电压为 42 kV 时, 开关的抖动为 91 μs 。

若火花开关不采用 LCR 触发电路, 则当电极间隙为 14 mm 时, 火花开关在 40 kV 工作电压下进行自击穿实验。在 20 次自击穿实验中, 开关有 2 次未发生击穿, 1 次提前导通, 其他击穿时延在 45~675 μs 范围内。由此可见, 与火花开关在脉冲充电电压下的自击穿电路相比, LCR 触发电路对火花开关的击穿时延和抖动有明显改善。

2.2.4 输出电压

当充电电压为 34 kV 时, 测量了 600 Ω 负载电阻上的电压波形。图 8 给出了负载在开关连续工作 10 次时所获得的电压波形。从图 8 中可以看出, 10 次测量所得的电压波形几乎完全重叠。输出电压的幅值在 33.4~34 kV 范围内, 电压的平均值为 33.7 kV, 标准偏差为 0.188 kV。输出电压的上升时间在 23~28 ns 范围内。

2.2.5 能量损耗

电流测试使用的探头为 Pearson6600(变比 10:1, 可测电流上升前沿 >4.8 ns)。负载 600 Ω 电阻上的典型电压和电流波形如图 9 所示。其峰值电压和峰值电流分别为 33.58 kV 和 54.61 A, 10%~90% 电压的上升时间为 25 ns。电阻 Z 的功率 P_Z 和单次消耗的能量 E_Z 分别为:

$$P_Z = U_Z I_Z; \quad (10)$$

$$E_Z = \int P_Z dt = \int U_Z I_Z dt. \quad (11)$$

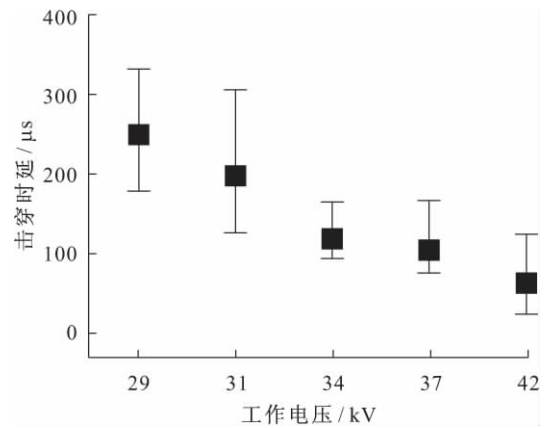


图 7 火花开关在不同工作电压下的击穿时延和抖动
Fig. 7 Switch on time delay and jittering of spark switch with different working voltages

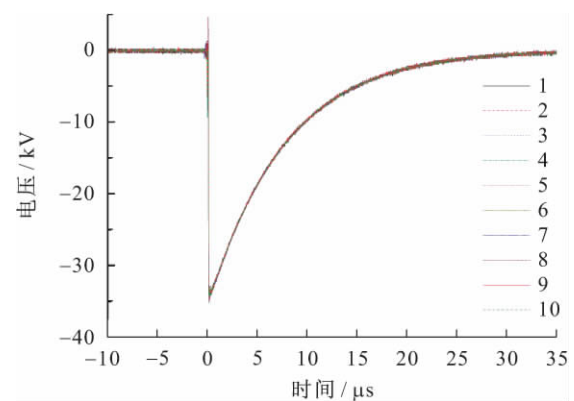


图 8 火花开关连续工作 10 次时输出的电压波形
Fig. 8 Waveforms of output voltages of spark switch of continuously operating ten times

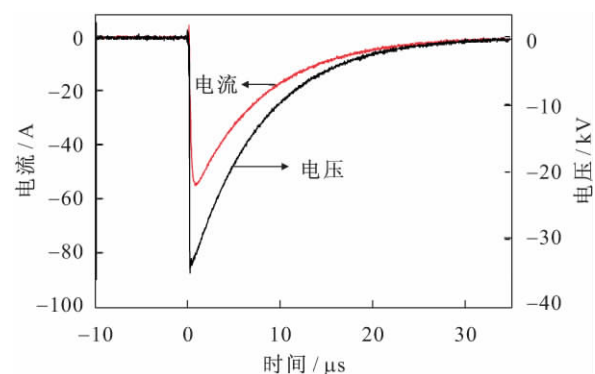


图 9 负载电阻 Z 上典型的电压和电流波形
Fig. 9 Typical waveforms of voltage and current on the resistor Z

式中: U_Z 是电阻 Z 上的电压; I_Z 是流经电阻 Z 的电流。图 10 为负载 Z 在图 9 所示的电压和电流波形下计算得到的功率 P_Z 和能量 E_Z , 负载 Z 获得的功率的峰值为 1.776 MW, 单次消耗的脉冲能量为 8 J。高压充电电容 C_h 的初始储能为

$$W = \frac{1}{2} C_h U_h^2. \quad (12)$$

式中, U_h 为电容器 C_h 上的充电电压。

由高压充电电容 C_h 大小和充电电压的大小计算得到 C_h 单次脉冲供能为 8 692 J。

储能电容上的能量 W 耗散在 2 个方面, 一个是电阻上的能耗 E_Z , 另一部分为损耗的能量 E_{loss} , 电路的能量损耗率 η 定义为

$$\eta = 1 - \frac{E_Z}{W} \quad (13)$$

代入相应的值可以计算得到, 在 600 Ω 负载条件下, LCR 触发电路的总能量损耗率为 8%。

在不考虑线路电阻的情况下, 电路损耗的能量 E_{loss} 包括 3 个部分: 触发电容 C 上的能量损耗 E_C , 触发电阻 R 上的能量损耗 E_R 和火花开关导通时火花通道上的能量损耗 E_{spark} , 即

$$E_{loss} = E_C + E_R + E_{spark} \quad (14)$$

其中, 由触发电容 C 引起的能量损耗 E_C 和触发电阻 R 引起的能量损耗 E_R 均为触发回路对电路造成的能量损耗。触发回路上的能量损耗 $E_{trigger}$ 为

$$E_{trigger} = E_C + E_R \quad (15)$$

触发电容 C 、触发电阻 R 和火花通道上的能量损耗率 η_C 、 η_R 和 η_{spark} 采用下式进行计算:

$$\eta_C = \frac{E_C}{W}; \quad (16)$$

$$\eta_R = \frac{E_R}{W}; \quad (17)$$

$$\eta_{spark} = \frac{E_{spark}}{W} \quad (18)$$

触发回路上能量损耗率 $\eta_{trigger}$ 定义为

$$\eta_{trigger} = \frac{E_{trigger}}{W} \quad (19)$$

当火花开关阳极和触发极间的电压达到气体间隙的击穿电压时, 火花开关上半部分的气体间隙发生击穿, 此时, 触发电容 C 上存储的能量将会释放到击穿的气体间隙中。触发电容 C 引起的能量损耗 E_c 可以通过下式进行估算

$$E_c = \frac{1}{2}CU_c^2 \quad (20)$$

式中 U_c 为触发电容上的电压。触发电阻 R 引起的能量损耗 E_R 为

$$E_R = \int \frac{U_R^2}{R} dt \quad (21)$$

图 11 给出了触发电阻 R 上典型的电压波形 U_R 和对应的能量损耗 E_R 。由图 7 中可知, 在火花开关导通时刻, 触发电容 C 上的电压 $U_c = 27.1$ kV。将相应值带入式(20)和式(21), 可以计算得到 C 和 R 上消耗的能量 E_c 、 E_R 分别为 0.11 J 和 0.078 J。图 12

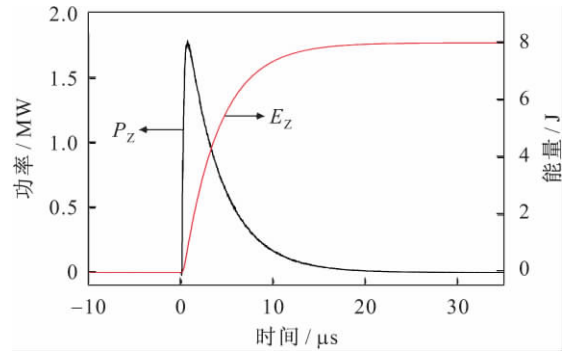


图 10 负载电阻 Z 上消耗的功率和能量

Fig. 10 Typical output power and energy consumed by the resistor Z

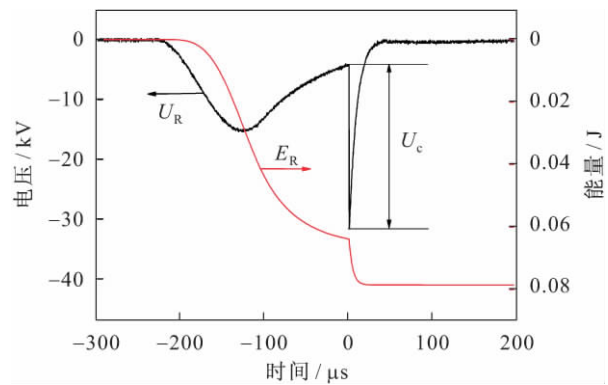


图 11 触发电阻 R 上的电压波形和对应的能量损耗

Fig. 11 Typical voltage waveforms on triggered R and consumed energy

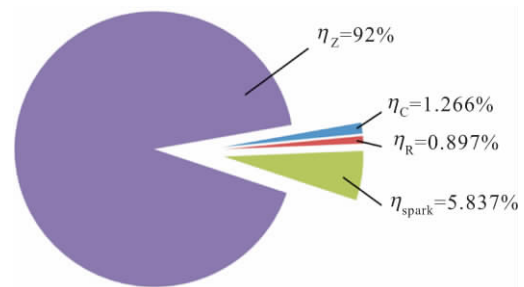


图 12 电路中各部分的能量耗散情况

Fig. 12 Energy consumed on the electrical elements in the circuit

给出了电路各部分的能量消耗情况, 注入到电阻 Z 上的能量损耗率 $\eta_z = 92\%$; 火花通道上的能量损耗率 $\eta_{spark} = 5.837\%$; 触发电容上的能量损耗率 $\eta_C = 1.266\%$; 触发电阻上的能量损耗率 $\eta_R = 0.897\%$; LCR 触发电路引入的总能量损耗率 $\eta_{trigger} = 2.163\%$ 。

2.2.6 电极烧蚀

为了了解开关的寿命以及不同位置的电极烧蚀情况, 每次实验都记录开关的导通次数。在经历了约 2.5 万次导通后, 环形电极的 2 个面都有均匀分

布的黑点,电极烧蚀均匀。其中电极的阳极面在开关导通的过程中接受电极的轰击,形成的黑点更为致密,其烧蚀的程度更深。图 13 为中间电极在开关导通 2.5 万次后烧蚀的照片,电极在烧蚀的前后厚度并没有发生明显的变化,说明该结构的火花开关具有较好的抗烧蚀性能。

3 讨论

在不增设外部电源的情况下,LCR 触发方法在原电路基础上并联 1 个由电感、电容和电阻组成的支路,利用火花开关最中间电极(触发极)上电位的改变,来导通触发火花开关。与火花开关自击穿相比,LCR 触发的火花开关提高了开关工作的稳定性,输出的电压波形基本一致。

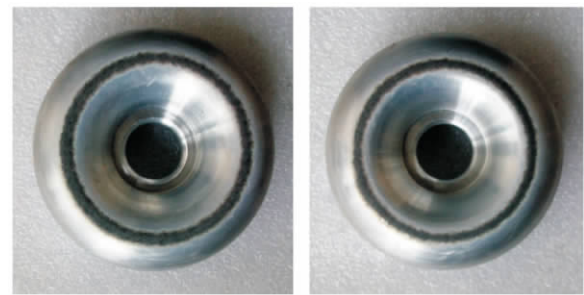
由于受到初级脉冲充电电源工作频率的限制,本文并没有给出火花开关在高重复频率下的实验结果(目前实验采用的初级脉冲充电电源能够在 1~30 Hz 范围内稳定工作)。从 LCR 触发电路的工作特性来看,利用气流吹扫气体间隙,LCR 触发方法火花开关可以在高重复频率下(>100 Hz)稳定运行。

基于 LCR 触发的火花开关在气体处理、食品灭菌、水中放电等方面具有广泛的应用^[9-11,24-26]。在这些应用过程中,并不需要准确控制脉冲的发生,LCR 触发方法能够使开关输出电压稳定,并减小开关的击穿时延,提高开关的工作频率。本文给出了该火花开关在实际应用中的性能测试结果。将 600 Ω 的测试电阻换为如图 14 所示的等离子体杀菌反应器。等离子体反应器为不锈钢圆筒,体积为 2.5 L,装液量为 1.6 L。整个筒壁接地,高压电极悬在水面上的高度在 3~5 mm 范围内,由 1 个聚四氟乙烯的绝缘子与地极隔开。等离子体由高压电极沿着水面延伸到接地的筒壁,产生紫外线、自由基、冲击波等复合效应杀灭水中的微生物。

图 15 是火花开关的典型输出电压和回路中的电流波形,电流使用的探头为 Pearson4997(变比 100:1,可测电流的上升前沿为 25 ns)。对电压和电流进行积分,可以计算得到注入到反应器的单次能量为 6 J。高压充电电容上的充电电压始终保持在 34 kV,单次储能为 8 692 J,根据式(13)计算得到开关的能量损耗率为 31%。

在火花开关连续运行 20 次后,负载上获得的电压幅值在 30~31.4 kV 范围内;击穿时延在 75~205 μ s 范围内;开关的能量损耗率在 27%~37% 范围内。

在相同的实验条件下,本文研究了火花开关在



(a) 电极的阳极面

(b) 电极的阴极面

图 13 2.5 万次导通后中间电极烧蚀的照片

Fig. 13 Photos of intermediate electrode after 2.5×10^4 shots of switching

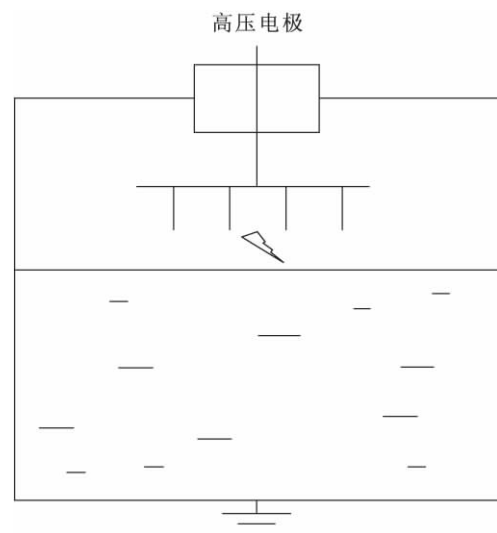


图 14 等离子体杀菌反应器

Fig. 14 Plasma reactor for water disinfection

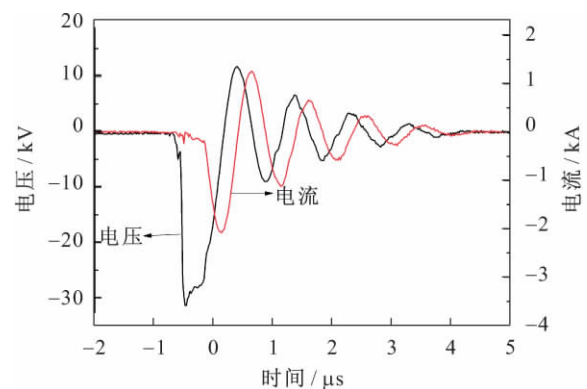


图 15 反应器上的典型的电压和电流波形

Fig. 15 Typical waveforms of voltage and current on the reactor

无 LCR 触发电路时的工作特性,即火花开关工作在自击穿状态。在连续运行 20 次后,火花开关有 5 次没有导通(负载上无电压输入)。图 16 为火花开关分别在有、无 LCR 触发电路情况下连续运行 20 次时负载上获得的幅值电压。从图 16 中可以看出,

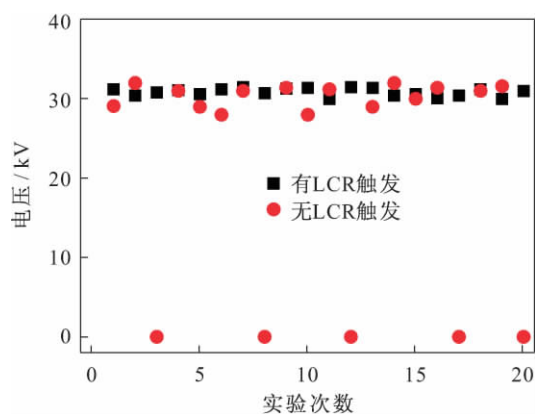


Fig. 16 火花开关分别在有、无 LCR 触发电路情况下连续运行 20 次时负载上获得的幅值电压

Fig. 16 Output amplitude voltages on the load of continuous 20 switching times of the spark with/without LCR triggered circuits

LCR 触发的火花开关工作性能更为稳定,输出的电压幅值基本一致。

4 结论

本文自行搭建了 LCR 触发的多级多通道火花开关。利用 μs 上升前沿的脉冲电源对低电感的陶瓷电容充电,以火花开关作为短脉冲形成开关,在 $600\ \Omega$ 负载电阻下测试得到了火花开关的工作性能。

1)当火花开关的总间隙为 $14\ \text{mm}$ 时,开关稳定工作的电压范围为 $29\sim 45\ \text{kV}$ 。

2)当火花开关的工作电压为 $34\ \text{kV}$ 时,火花开关的平均导通时延和抖动分别为 $115\ \mu\text{s}$ 和 $71\ \mu\text{s}$;负载上的峰值功率为 $1.776\ \text{MW}$;电阻上获得的电压波形基本一致,电压幅值在 $33.4\sim 34\ \text{kV}$ 范围内,负载上电压沿的上升时间在 $23\sim 28\ \text{ns}$ 范围内;开关典型的能量损耗率为 8% ,其中触发电路上的能量损耗率为 2.163% 。

3)火花开关在累计工作 2.5 万次后,开关电极烧蚀均匀,中间电极的厚度无变化。

4)利用该火花开关开展了等离子体水中灭菌的实验研究,考察了开关的工作性能。火花开关在连续运行 20 次后,负载上获得的电压幅值在 $30\sim 31.4\ \text{kV}$ 范围内,开关的击穿时延在 $75\sim 205\ \mu\text{s}$ 范围内,能量损耗率在 $27\%\sim 37\%$ 范围内。火花开关分别在有、无 LCR 触发电路情况下连续运行 20 次的对比实验证明:LCR 触发方法能够显著提高多级多通道火花开关的工作稳定性。

参考文献 References

[1] 刘锡山. 高功率脉冲技术[M]. 北京:国防工业出版社, 2005;

338-360.

LIU Xishan. High pulsed power technology[M]. Beijing, China: National Defence Industry Press, 2005: 338-360.

[2] 贺臣. 重复频率长寿命气体火花开关的研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2005: 16-35.

HE Chen. Study on the repetitive-rate long-lifetime gas spark switch[D]. Wuhan, China: Huazhong University of Science and Technology, 2005: 16-35.

[3] 刘鹏,魏浩,孙凤举,等. 快放电直线变压器型驱动源用场畸变型低电感气体火花开关[J]. 高电压技术, 2011, 37(10): 2554-2559.

LIU Peng, WEI Hao, SUN Fengju, *et al.* Low inductance field-distortion gas spark switches for fast linear transformer drivers[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(10): 2554-2559.

[4] Rim G H, Cho C H. Design and testing of a rotary arc gap-switch for pulsed power[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2000, 28(5): 1491-1496.

[5] 邹晓兵,朱宏林,王新新,等. 纳秒级高压快脉冲发生器的研制[J]. 高电压技术, 2011, 37(3): 787-792.

ZOU Xiaobing, ZHU Honglin, WANG Xinxin, *et al.* Development of a nanosecond fast pulse generator[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(3): 787-792.

[6] Cheng X B, Liu J L, Qian B L, *et al.* Research of a high-current repetitive triggered spark-gap switch and its application[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2010, 38(3): 516-522.

[7] 谢建民,邱毓昌,张馨兰. 多通道伪火花开关及其触发技术[J]. 高电压技术, 2001, 27(3): 9-11.

XIE Jianmin, QIU Yuchang, ZHANG Qinglan. Multi-channel pseudo-spark switches and triggering technology[J]. High Voltage Engineering, 2001, 27(3): 9-11.

[8] 吴撼宇,张信军,王亮平,等. 2 MV 激光触发多级气体开关结构设计[J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(3): 630-634.

WU Hanyu, ZHANG Xinjun, WANG Liangping, *et al.* Structural design of 2 MV laser triggered multi-stage gas switch[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012, 24(3): 630-634.

[9] Yan K, Heesch E J M, Nair S A, *et al.* A triggered spark-gap switch for high-repetition rate high-voltage pulse generation[J]. Journal of Electrostatics, 2003, 57(1): 29-33.

[10] Winands G J, Liu Z, Yan K, *et al.* Long lifetime, triggered, spark-gap switch for repetitive pulsed power applications[J]. Review of Scientific Instruments, 2005, 76(8): 085107-6.

[11] Yan K, Winands G J, Liu Z, *et al.* An industrial streamer corona plasma system for gas cleaning[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2006, 34(5): 2426-2433.

[12] 李涛. 高库仑量大电流气体火花开关的工程应用研究[D]. 武汉:华中科技大学, 1999: 7-15.

LI Tao. Engineering application research of high coulomb and high current gas spark switch[D]. Wuhan, China: Huazhong University of Science and Technology, 1999: 7-15.

[13] 赖贵友,郭良福,力一峥,等. 大电流两电极气体开关研究[J]. 强激光与粒子束, 2006, 18(6): 1037-1040.

LAI Guiyou, GUO Liangfu, LI Yizheng, *et al.* High current two-electrode gas switch[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2006, 18(6): 1037-1040.

[14] Liu Z, Yan K, Winands G J. Multiple-gap spark gap switch[J]. Review of Scientific Instruments, 2006, 77(7): 073501-4.

[15] Etlicher B, Frescaline L, Lamain H, *et al.* Low inductive trig-

gered multichannel surface switch for inductive energy storage generator[C]//10th IEEE Pulsed Power Conference. Albuquerque, USA: IEEE, 1995: 243.

- [16] Kim A A, Kovalchuk B M, Kremnev V V, *et al.* Multi-gap, multi-channel spark switches[C]//11th IEEE Pulsed Power Conference. Baltimore, USA: IEEE, 1997: 862-867.
- [17] Kovalchuk B M. Multigap spark switches[C]//11th IEEE International Pulsed Power Conference. Baltimore, USA: IEEE, 1997: 59-67.
- [18] Kovalchuk B M, Kim A A, Kumpja E V, *et al.* Multi-gap switch for marx generators[C]//13th International Conference on Pulsed Power Plasma Science. Nevada, USA: IEEE, 2001: 1739-1742.
- [19] Sun F J, Zeng J T, Qiu A C, *et al.* Experimental study of the multi-gap multi-channel gas spark closing switch[J]. Plasma Science and Technology, 2001, 3(4): 871-876.
- [20] 孙凤举, 邱爱慈, 邱毓昌, 等. 多级多通道低电感火花气体开关[J]. 高压电器, 2001, 37(5): 37-41.
SUN Fengju, QIU Aici, QIU Yuchang, *et al.* Multi-gap multi-channel low inductance gas spark closing switch [J]. High Voltage Apparatus, 2001, 37(5): 37-41.
- [21] 梁天学, 孙才新, 邱爱慈, 等. 200 kV 多级多通道气体开关



ZHANG Zhicheng
Ph. D. candidate



ZHANG Xuming
Ph. D.



ZHENG Chao
Ph. D. candidate

章志成

1983—,男,博士生

研究方向为脉冲功率技术在资源与环境领域应用

电话:(0571)88210786

E-mail: qiushizj@163.com

章旭明

1981—,男,博士

研究方向为脉冲功率技术在环境与能源领域的应用

电话:(0571)88210786

E-mail: miraclezhang918@163.com

郑超

1985—,男,博士生

研究方向为脉冲功率技术和等离子体在生物学上的应用

电话:(0571)88210786

E-mail: chaozheng@zju.edu.cn

[J]. 高电压技术, 2006, 32(10): 56-58.

LIANG Tianxue, SUN Caixin, QIU Aici, *et al.* Multi-gap multi-channel 200 kV gas spark switch for fast LTD[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(10): 56-58.

- [22] 刘轩东, 孙凤举, 梁天学, 等. 多级多通道气体火花开关的同步放电特性[J]. 高电压技术, 2009, 35(3): 672-677.
LIU Xuandong, SUN Fengju, LIANG Tianxue, *et al.* Synchronous discharge characteristics of multi gap multi-channel gas Switch [J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(3): 672-677.
- [23] Yan K. Corona plasma generation[D]. Netherlands, Eindhoven; Eindhoven University of Technology, 2001: 89-100.
- [24] Liu Z, Yan K, Pemen A, *et al.* Synchronization of multiple spark-gap switches by a transmission line transformer[J]. Review of Scientific Instruments, 2005, 76(11): 113507-4.
- [25] Zheng C, Xu Y Z, Huang H M, *et al.* Water disinfection by pulsed atmospheric air plasma along water surface[J]. AIChE Journal, 2012, 45: 13929.
- [26] 章志成, 裴彦良, 闫克平, 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(7): 1719-1725.
ZHANG Zhicheng, PEI Yanliang, YAN Keping, *et al.* Experimental research on rock breakdown under short high-voltage pulse [J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(7): 1719-1725.



DENG Guanlei
Ph. D. candidate



YAN Keping
Ph. D., Professor



LIU Zhen
Ph. D.
Associate Professor

邓官垒

1987—,男,博士生

研究方向为脉冲功率技术及其应用

电话:(0571)88273897

E-mail: northenting@gmail.com

闫克平

1962—,男,博士,教授,博导

研究方向为应用低温等离子体,电除尘和脉冲功率技术

电话:(0571)88210340

E-mail: Kyan@zju.edu.cn

刘振

1978—,男,博士,副教授

研究方向为脉冲功率技术

电话:(0571)88273897

E-mail: Zliu@zju.edu.cn

收稿日期 2012-12-15 修回日期 2013-01-23 编辑 程子丰