

气体触发开关击穿过程的光学测量实验研究

门涛¹⁾ 高景明 刘列 文建春

(国防科技大学光电科学与工程学院 长沙 410073)

摘要 文章首先介绍了气体触发开关的三电极结构, HSFC-PRO 超高速相机的主要性能参数和使用 HSFC-PRO 超高速相机进行气体触发开关的击穿过程的光学测量实验的实验设计, 并利用 ANSYS 软件对触发开关三电极导通过程进行静电场模拟. 初步实验结果表明, 气体触发开关击穿过程可分为两个阶段, 即触发极与正电极击穿后再与负电极击穿, 实验结果与静电场模拟结论一致. 该气体触发开关在 24ns 时正负电极已完全击穿导通, 击穿过程迅速, 并且击穿导通过程在 10.5 μ s 以上, 0 至 4.5 μ s 时间内正负电极之间放电火花依次明显增强, 而 6 至 10.5 μ s 内放电火花依次减弱, 到 10.5 μ s 时放电火花最弱, 气体触发开关击穿导通过程基本结束. 实验证明, 超高速相机是研究开关快速击穿放电导通过程的有效手段, 本实验为进一步研究高压开关击穿导通过程并提高开关耐压性能提供了参考.

关键词 高压触发开关 放电火花 超高速相机 同步触发

1 引言

高功率脉冲技术中, 开关技术具有特殊重要的地位. 它不仅决定了脉冲功率装置的输出特性, 甚至是脉冲功率系统成败的关键. 具有耐受电压高、导通电流大、击穿时延短、抖动小、电感和电阻小、电极烧损小等不同性能的各种类型开关的研制, 是脉冲功率技术中的重要研究内容. 气体触发开关是利用气体击穿特性工作的开关, 因为其结构简单、容易操作等优点得到了广泛的应用^[1-4].

超高速像机已广泛应用于军事科学和民用科学领域, 可在纳秒量级内记录开关击穿导通过程, 是研究气体开关击穿过程的重要光学测量手段.

2 实验设计及理论模拟

实验系统主要由气体触发开关和超高速相机两大部分组成. 气体触发开关主放电电极为铜制圆球, 中部有一根钨针作为触发电极, 采用有机玻璃制成绝缘压力容器, 通过四根金属杆将整个开关结构紧固成一体. 主电极间隙约为 10mm, 触发极为直径 4mm 的钨棒位于两主电极之间, 触发极中轴线距低电位电极 4.5mm, 负载是阻值为 60 Ω 的水电阻.

市电经硅堆与充电电阻对 27nF 脉冲电容器进行充电, 充电完毕后, 由互感器输出 -8kV 的触发信号,

使开关迅速导通, 同时使电容器完成对阻性负载的放电, 负载上采用是电容分压器进行测量, 其分压比约为 1000. 经初步检验, 当电容器充电电压为 8kV 时, 开关可以稳定工作.

本实验室使用德国 HSFC-PRO (High Speed Framing Camera) 超高速相机. 该超高速相机有 4 个 MCP (微通道板) 像增强器模块, 最短曝光时间 3ns, 可在 1ns 帧间隔时间下, 超高速记录 4 张满幅影像像素 1280 \times 1024, 12Bit 动态存储范围. 相机有电触发和光触发两种触发方式, 电触发需通过 TTL 电平 (5V) 的上升沿触发, 触发脉冲上升时间必须小于 20ns. 实验装置布局见图 1, 超高速相机直接对准气体触发开关电极进行拍照. 由图 2, 从气体触发开关负载上经电容分压器后提取的电触发信号电压 4V、上升沿约为 20ns, 符合相机外部电触发要求, 可以进行光学测量实验.

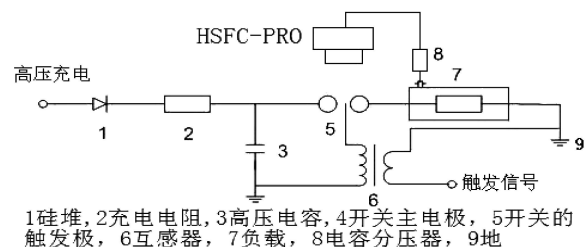


图 1 实验装置示意图

2008 - 01 - 07 收稿

1) E-mail: mentao1330@163.com

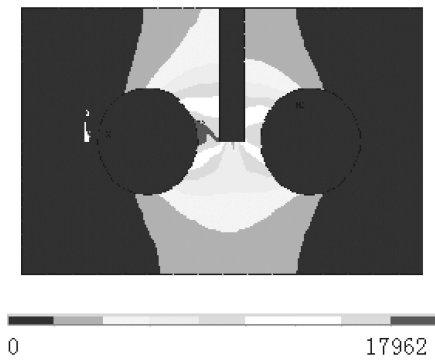


图 2 触发开关电场分布图

如图2所示, 使用 ANSYS 软件对触发开关电场分布进行模拟, 图中左侧为正电极, 电压 10kV, 右侧电极接地, 而触发极电压为 4kV, 触发极中轴线距低电位电极较近. 由模拟结果可知, 触发极与正电极间场强较大, 最先击穿导通.

3 实验结果及分析

选择单曝光模式, 4个通道的延迟时间分别设置为 0, 8ns, 16ns, 24ns (即每个通道间隔 8ns 开始拍照), 曝光时间均设置为 8ns, 相机记录了 0 到 32ns 连续时间段内气体触发开关的击穿导通过程. 图3是单曝光模式下气体触发开关击穿导通照片, 从相机通道1所拍摄照片中可以看到触发电极与正电极首先击穿导通, 有放电火花产生, 这是由于触发极与正电极之间电压为 6kV, 而触发极与负电极之间电压为 4kV, 故触发极与正电极先导通. 8ns 后通道2所拍摄照片可看到触发极与正电极间的放电火花增强, 并且触发极与负电极开始击穿导通, 有比较弱的放电火花产生. 16ns, 24ns 后通道3, 4的照片中触发极与负电极间的放电火花相对与照片2明显依次增强, 并且通道4照片中触发极与正负电极间的放电火花强度基本一致, 证明此气体触发开关在 24ns 后正负电极已完全击穿导通.

选择双曝光模式, 即每个通道曝光两次, 可拍摄八幅照片, 设置八幅照片的时间延迟依次为 1.5 μ s, 曝光时间均为 20ns. 如图4所示, 实验拍摄得到气体触发开关 10.5 μ s 内击穿导通过程的8幅照片, 第一行4幅照片为四通道第一次曝光的照片, 第二行4幅照片为第二次曝光的照片, 每一列的两幅照片为同一通道所拍摄. 由实验照片所示, 0至 4.5 μ s 时间内正负电极之间放电火花依次明显增强, 而 6至 10.5 μ s 内放电火花依次减弱, 到 10.5 μ s 时放电火花最弱, 气体触发开关击穿导通过程基本结束. 实验证明该开关导通过程持

续 10.5 μ s 以上.

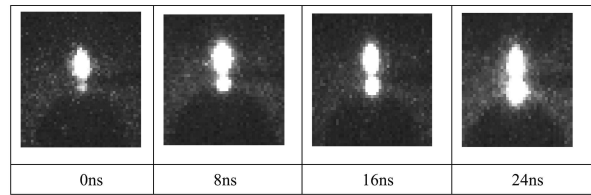


图 3 单曝光模式下气体触发开关击穿导通照片

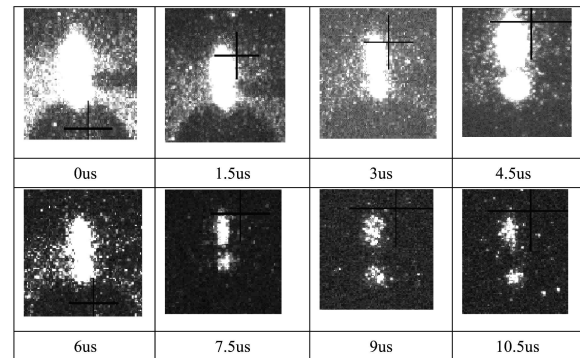


图 4 双曝光模式下气体触发开关击穿导通照片

HSFC-PRO 超高速相机存在无法消除的 48ns 系统延迟时间, 实验中由触发开关的触发极引出相机触发信号, 当开关开始击穿后 48ns 相机才开始拍摄第一幅照片, 相机无法与开关保持同步工作. 另外, 实验中我们从开关的负载上引入相机的外部电触发信号, 当开关导通后负载上的电压才使相机触发拍照, 不能观察到开关开始击穿导通时刻的放电现象. 后续实验中我们拟使用时间延迟发生器, 输出两路触发信号, 一路信号触发气体开关, 一路信号提前 48ns 触发超高速相机^[5, 6]. 这样才能使相机真正保持与开关同步触发, 拍摄到击穿导通起始时刻的放电火花照片, 深入研究其物理现象.

4 结论

本文采用光学测量方法研究气体触发开关击穿导通过程. 由超高速相机所得到的纳秒量级和微妙量级开关击穿导通过程图像可以看出, 气体触发开关击穿过程可分为两个阶段, 实验结果与静电场模拟结果相符合, 并且击穿过程持续时间在 11.5 μ s 以上. 实验证明, 光学测量方法是研究高压开关击穿导通过程的有效手段. 本实验为进一步研究高压开关击穿过程打下了一定的理论和实验基础.

参考文献(References)

- 1 LIU Xi-San. High Pulse Power Technology[M]. Bijing: National Deference Industry Press, 2005 (in Chinese)
(刘锡三. 高功率脉冲技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005)
- 2 WANG Ying. High Pulse Power Supply [M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1991 (in Chinese)
(王莹. 高功率脉冲电源[M]. 北京: 原子能出版社, 1991)
- 3 LI Zheng-Ying. Pusle Power Technology [M]. Beijing: Water Resource and Electric Power Press, 1992 (in Chinese)
(李正瀛. 脉冲功率技术[M]. 北京: 水利电力出版社, 1992)
- 4 LIANG Tian-Xue, CONG Pei-Tian, GUAN Ying et al. High Voltage Apparatus, 2004, **40**(2): 109—111 (in Chinese)
(梁天学, 丛培天, 关颖等. 高压电器, 2004, **40**(2): 109—111)
- 5 ZHANG Qiao-Gen, CHEN Qing-Guo, QIU Yu-Chang et al. Advanced Technology of Electrical Engineering Energy, 2000, **20**(1): 22—25 (in Chinese)
(张乔根, 陈庆国, 邱毓昌等. 电工电能新技术, 2000, **20**(1): 22—25)
- 6 Krasik Ya E, Dunaevsky A, Felsteiner J. J. Appl. Phys., 1999, **85**(11): 7946—7951

Experimental Study of the Gas Triggered Switch's Breakdown by Optical Measurement

MEN Tao¹⁾ GAO Jing-Ming LIU Lie WEN Jian-Chun

(College of Photoelectric Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract In this paper the main technical data of the high speed camera (HSFC-PRO), components of gas triggered switch and the primary experimental results of the breakdown of gas triggered switch using high speed camera are introduced. Four photographs totaling in 24 nanoseconds in single trigger mode manifest that the breakdown consists of two phases, which are the breakdowns of the trigger electrode with positive and negative electrode successively. This phenomenon is consist with the electric field distribution simulation result with the help of the software ANSYS. Eight photographs in double trigger mode prove that the breakdown time of the gas triggered switch is above 10.5 microseconds. The elementary results show that high speed camera is a very efficient apparatus to study the discharge characteristics. This optical measuring technique is helpful to profoundly study the breakdown of high voltage switch. More studies and experiments would be continued in future.

Key words high voltage triggered switch, discharge spark, high speed camera, synchronized trigger