

亚微秒负脉冲高电压击穿的水介质开关特性的实验研究

李享生 刘车波

(应用物理系)

摘要 本文提供了在O2装置上进行的水中亚微秒负脉冲高电压击穿的实验研究的结果。击穿场强 $\geq 250\text{KV/cm}$ ，进行统计性测量。实验研究用的电极材料为不锈钢，尺寸和形状各有不同。

关键词 水开关，脉冲高电压

1. 引言

由于水的介电常数($\epsilon_r=80$)高，自动恢复性能好，来源充足，费用低，易处理，无毒无腐蚀，通常用作高脉冲功率机器的中间能量储存介质和脉冲转换开关。特别是对于大的高能量高功率机器，更显示了它的优越性。水介质开关性能的好坏，直接影响加速器的带电粒子束的品质因素。我们的实验研究，目的是在大于 250KV/cm 的击穿场强作用下，对各种不同结构尺寸的不锈钢电极的水开关进行实验特性的比较，提供充足的实验数据，为建造大的高能量高功率机器设计理想的水介质开关提供实验依据。

电场强度和作用时间之间的关系用马丁经验公式表示^[1]，

$$E_{\max} t_{\text{eff}}^{\frac{1}{2}} = M / A^{\frac{1}{10}} \quad (1)$$

其中， E_{\max} 是击穿场强，单位 MV/cm ； t_{eff} 是有效作用时间，定义为场强超过击穿场强的63%的脉冲电压的持续时间，单位 μs ； A 是电极的有效作用面积，其上承受 $\geq 90\%$ 的击穿场强，单位是 cm^2 ； M 是常数，其值在 $0.3\sim 0.6$ 范围^[2]。 M 值可以作为水电容系统的品质因子，越大越好。

水介质脉冲高电压击穿的典型的脉冲电压波形如图1所示。如果测得水击穿的脉冲电压波形，就可定出 E_{\max} 和 t_{eff} 值，从而计算出 M 值。我们对加载脉冲电压的波头进行了计算分析^[3]，表明图1所示的波形是反映电极结构的最佳状态。

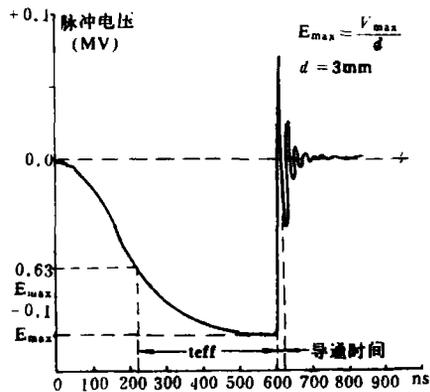


图1 水击穿的典型脉冲电压波形

人们对水击穿提出了各种模型。F. J. Sazama等^[3]提出一个支流模型 (Streamer Model), 并指出支流以 $10^5 \sim 10^6 \text{m/s}$ 的速度来闭合开关电极间隙。

我们的低脉冲高电压作用的实验结果证明^[5], 水击穿包括水分子极化, 即能量积累过程和电离, 形成通道, 发生击穿过程。对于大于等于 250KV/cm 的击穿场强, 主要是后一过程。

2. 实验装置

实验研究装置如图2所示, 由水控制系统, 脉冲高电压产生系统, 实验水箱和测试系统组成。

水控制系统由水过滤器, 离子交换柱, CS—ZO.5型超纯水终端装置, 水泵和实验水箱组成, 产生高水电阻率 ($>1 \text{M}\Omega\text{-cm}$) 的去离子水。实验前, 水循环足够时间, 使水的电阻率 ρ 达到 $5 \text{M}\Omega\text{-cm}$ 以上, 以保证在整个实验期间水箱中的去离子水的电阻率保持在 $2 \text{M}\Omega\text{-cm}$ 以上。水温采取自然温度 ($8 \sim 15^\circ\text{C}$), 我们以前的实验研究^[5]证明水温对击穿特性影响不大。实验水箱是用厚3cm的有机玻璃板焊接而成, 长 $40 \text{cm} \times$ 宽 $40 \text{cm} \times$ 高 40cm 。

脉冲高电压产生系统由MARX产生器, 直流高压充电设备, MARX触发器组成。MARX产生器由两台MY—100—0.36电容器组装, 电容器间连一充气火花间隙开关。电容器并联充电, 当触发器产生的触发脉冲使火花间隙开关导通后, MARX产生器串联放电, 对水介质开关输出一高幅值的负脉冲电压, 以使电极间水介质发生击穿。

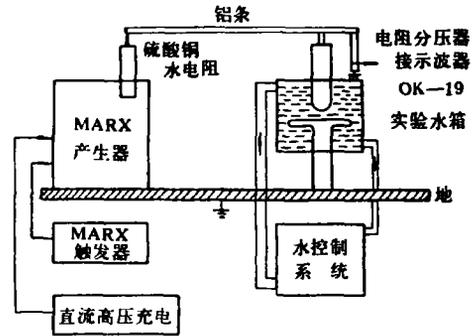


图2 实验装置示意

电极材料是不锈钢, 我们采用平板, 半球头和多针电极, 电极结构和几何尺寸如图3所示。

测试系统由硫酸铜水溶液电阻分压器, OK—19高压示波器组成, 用普拉相机拍照, 电压幅值灵敏度为 13.8KV/mm 。

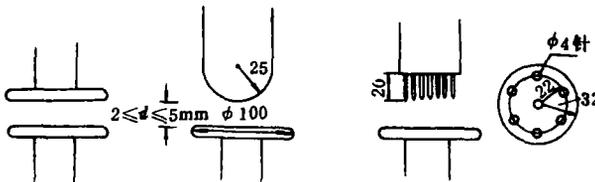


图3 电极的几何尺寸

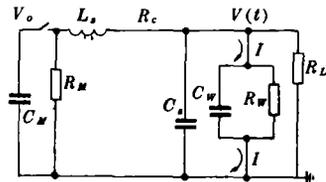


图4 装置电路

实验装置的电路如图4所示。

C_M (MARX电容) $=0.18 \mu\text{F}$; R_M (MARX接地电阻) $=20 \text{k}\Omega$; L_s (杂散电感) $=2.3 \mu\text{H}$; C_s (杂散电容) $=0.1 \text{nF}$; R_c (充电电阻) $=50 \Omega$; C_w (水电容) $=0.4 \sim 2.0 \text{nF}$; R_w (水电

阻) $\approx 15\text{K}\Omega$; R_L (分压器电阻) $= 22\text{K}\Omega$ 。

文献[3]中的分析指出, 比值 $C_M/(C_W + C_S)$ 的大小对水介质开关的性能有重大的影响。就我们的装置而言, 比值等于80是适宜的。

3. 实验结果

由于水介质的击穿包括两个过程, 击穿特性受多种因素的影响, 实验数据存在较大的分散性, 因此进行统计测量。下面给出几个参数的实验结果。

1) 水电容系统的品质因子 M

根据公式(1), 有 $M_i = E_{\max i} t_{\text{eff}i}^{\frac{1}{3}} A^{\frac{1}{10}}$ (2)

其中 $E_{\max i} = V_{\max i} / d_i$ (3)

式中 $V_{\max i}$ 为加载在电极上的击穿电压, 单位MV; d_i 为电极间距, 单位cm; 对于有效面积 A , 半球(-)+平板(+)电极是 $\frac{2}{3}\pi R^2$, R 是半球的半径, 多针(-)+平板(+)电极, 是外围六根针布局的圆的面积。

表1列出了各种电极的 N 次数据的 M 的平均值 $\langle M \rangle_N$ 。

表1 各种电极的 M 的平均值

平板(-)+平板(+)	$\langle M \rangle_{10} = 0.41 \pm 0.02$
半球(-)+平板(+)	$\langle M \rangle_{14} = 0.53 \pm 0.03$
多针(-)+平板(+)	$\langle M \rangle_{10} = 0.24 \pm 0.04$

表2 各种电极的 $\langle t_{\text{eff}} \rangle_N$ 值

平板(-)+平板(+)	$\langle t_{\text{eff}} \rangle_{10} = 0.37 \pm 0.06 \mu\text{s}$
半球(-)+平板(+)	$\langle t_{\text{eff}} \rangle_{14} = 0.44 \pm 0.12 \mu\text{s}$
多针(-)+平板(+)	$\langle t_{\text{eff}} \rangle_{10} = 0.31 \pm 0.06 \mu\text{s}$

2) 有效作用时间 t_{eff}

表2列出了各种电极的有效作用时间的平均值 $\langle t_{\text{eff}} \rangle_N$ 。

3) 击穿场强 E_{\max}

MARX产生器的直流充电电压范围在 $45\text{KV} \times 2$ 至 $50\text{KV} \times 2$, 三种电极的击穿场强范围有较大的不同: 平板(-)+平板(+)电极为 300.0KV/cm 至 518.2KV/cm , 半球(-)+平板(+)电极为 322.7KV/cm 至 750.0KV/cm , 多针(-)+平板(+)电极为 525.0KV/cm 至 722.7KV/cm 。表3列出各种电极的平均击穿场强 $\langle E_{\max} \rangle_N$ 。从表中可以看出, 从平板到半球再到多针, 击穿场强是逐步明显提高的。

表3 平均击穿场强 $\langle E_{\max} \rangle_N$

平板(-)+平板(+)	$\langle E_{\max} \rangle_{10} = (385.3 \pm 13.9)\text{KV/cm}$
半球(-)+平板(+)	$\langle E_{\max} \rangle_{14} = (498.5 \pm 42.0)\text{KV/cm}$
多针(-)+平板(+)	$\langle E_{\max} \rangle_{10} = (633.1 \pm 19.0)\text{KV/cm}$

4) 支流平均速度 v_p

开关在导通时, 电极间隙的水介质电离形成击穿通道(支流), 以平均速度 v_p 来闭合开关电极间隙。如图1所示, 我们从测得的脉冲电压波形上量出开关的导

通时间 t_p , 除电极间距 d , 就得支流平均速度 v_p : $v_p = d/t_p$ (4)

以平板(-)+平板(+)电极为例, 我们测得的支流平均速度 v_p 为 $(2 \sim 8) \times 10^5 \text{m/s}$ 。

5) 脉冲电压波形照片

上图是三种电极的典型的脉冲电压波形照片。

幅值灵敏度13.8KV/mm, 时标0.01 μ s

(1) 平板(-)—平板(地)

$$\rho = 6.25\text{M}\Omega \cdot \text{cm}, d = 2\text{mm}$$

$$\rho = 7.14\text{M}\Omega \cdot \text{cm}, d = 3\text{mm}$$

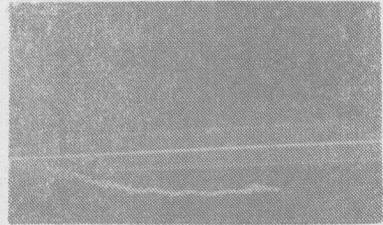
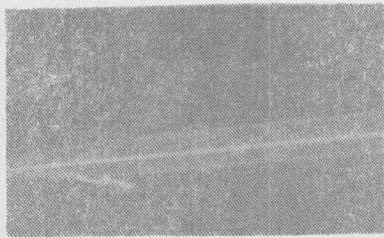


图5

(2) 半球(-)—平板(地)

$$\rho = 7.4\text{M}\Omega \cdot \text{cm}, d = 2\text{mm}$$

$$\rho = 7.14\text{M}\Omega \cdot \text{cm}, d = 3\text{mm}$$

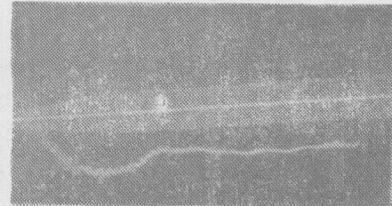
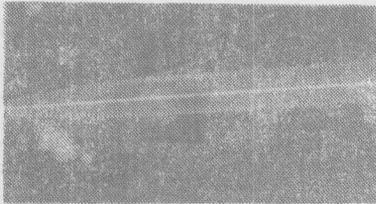


图6

(3) 多针(-)—平板(地)

$$\rho = 7.7\text{M}\Omega \cdot \text{cm}, d = 2\text{mm}$$

$$\rho = 7.7\text{M}\Omega \cdot \text{cm}, d = 2\text{mm}$$

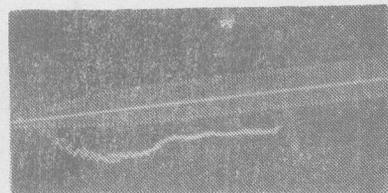
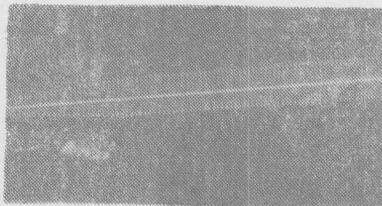


图7

4. 结 论

1) 由于水介质击穿包括两个过程, 击穿场强和作用时间都有一个很宽的范围。实验研究表明, 场强从75KV/cm到750KV/cm, 有效作用时间从0.10 μ s到33.60 μ s, 都可以发生击穿(本文, 并参看文献[4])。作为开关, 希望击穿场强尽可能高, 作用时间尽可能短, 两者之间有一定的关系, 一般只需确定击穿场强。平板(-)+平板(+)电极取(350~400)KV/cm, 半球(-)+平板(+)电极取(450~550)KV/cm, 多针(-)+平

板(+)电极取(600~700)KV/cm, 较为适宜。

2) 作为高能量高功率机器的中间能量储存转换开关, 水介质开关应工作在脉冲击穿区, 电极的有效作用面积应尽可能大, 电极结构形式也有所要求。就前述三种电极结构而言, 平板(-)+平板(+)电极的水电容系统品质因子 M 较大, 有效作用时间 t_{eff} 较小, 各种参数的分散性小, 因而开关的性能较好。

致 谢

本实验研究是在李传胪主任指导下进行的。刘存华、谭启美、王勇等同志曾参加工作。在此一并感谢。

参 考 文 献

- [1] T.H.Martin, Pulsed Power of Fusion, in Proc. Int. Pulsed Power Conf., Lubbock, TX, Nov.1976, IEEE Cat. No. 76CH1147-8 Reg.5
- [2] J.P. Vandevender: Short Pulse Electrical Break-down Strength of H₂O, in Proc. Int Pulsed Power Conf. Lubbock, TX, Nov. 1976, IEEE Cat. No. 76CH117-8 Reg.5
- [3] F.J. Sazama, and V.L.Kenyon: A Streamer Model for High-Voltage Water Switches, IEEE, Vol, Ps-8, No.3.198(1980).
- [4] 李亨生、刘车波、叶增军: 低脉冲高电压作用下水介质击穿特性的实验研究。全国电子束加速器会议论文报告资料, 1985年10月
- [5] David B Feneman and Ronald J.Gripshover: Experiments on Electrical Break-down in Water in the Microsecond Regime, IEEE, Vol ps-8, No.3, 209(1980)

Experiments on Negative Pulse High-voltage Breakdown on Water Switching in the submicrosecond Regime

Li Xiangsheng Liu Chepo

Abstract

In this paper are given the results of the experiments on negative pulse high-voltage breakdown on Water Switching in the submicrosecond regime on 02* device in 206 Lab. Breakdown electric field ≥ 250 KV/cm. The Statistic measurements are carried out. The electrodes with different size and shape are made of stainless steel.

Key words Water Switch, Putse high-voltage