

毫微秒正脉冲高电压击穿的水介质开关特性实验研究

李享生 刘车波

(应用物理系)

摘要 本项研究是亚微秒负脉冲高电压击穿的水介质开关特性的实验研究工作^[1]的继续。研究表明,当毫微秒脉冲击穿时,要考虑电极间水电容的波阻抗对触发器脉冲能量的泄漏。

关键词 毫微秒正脉冲, 水电容的波阻抗

分类号 TN789.1

对于高能量高脉冲功率机器的中间能量存储和脉冲转换的水介质开关,通常工作在微秒击穿区。有时,需要将水介质开关工作在毫微秒区。如果是毫微秒脉冲击穿,马丁经验公式是否仍然成立,是否会有新的问题出现,其击穿现象同微秒脉冲击穿是否一致,本文通过实验研究,回答了这些问题。由于水介质的脉冲电击穿存在“怕正不怕负”问题,实验研究采用毫微秒正脉冲击穿电压。

1 实验装置

图1为实验装置示意图。其中去离子水系统、整流充电设备、实验水箱和测试系统

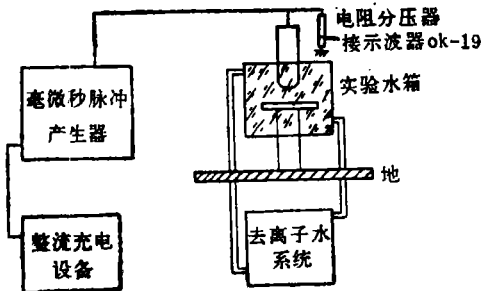


图1 实验装置示意

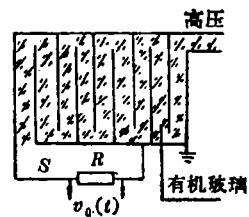


图3 脉冲形成线的结构

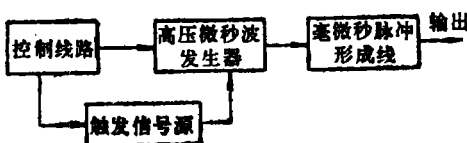


图2 毫微秒脉冲产生器结构框图

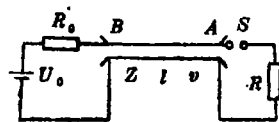


图4 脉冲形成原理图

同亚微秒实验研究装置是一样的。电极材料、结构尺寸也同亚微秒实验研究的一样^[1]。

毫微秒脉冲产生器的结构框图如图2所示。毫微秒脉冲形成线是由有机玻璃平行带组成的带状传输线，采用折叠式结构，如图3所示。其脉冲形成原理图如图4所示。负载 R 为 600Ω ，一个台阶脉冲的脉宽 100ns ，详细论述见文[2]。

2 实验结果及分析

表1给出了毫微秒正脉冲击穿水介质开关的实验结果，图5、6、7为三种电极结构开关的脉冲击穿的脉冲电压照片。从实验结果看出，三种电极中多针(+) + 平板(地)电极最易击穿，而平板(+) + 平板(地)电极最难击穿。这个结果与亚微秒实验结果正好相反(见表2)。其原因将在同亚微秒实验结果的比较中给以分析说明。

(1) 平板(+)——平板(地) 时标 $0.1\mu\text{s}$

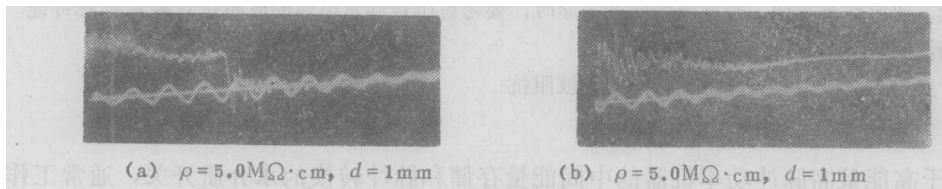


图 5

(2) 半球(+)——平板(地) 时标 $0.01\mu\text{s}$

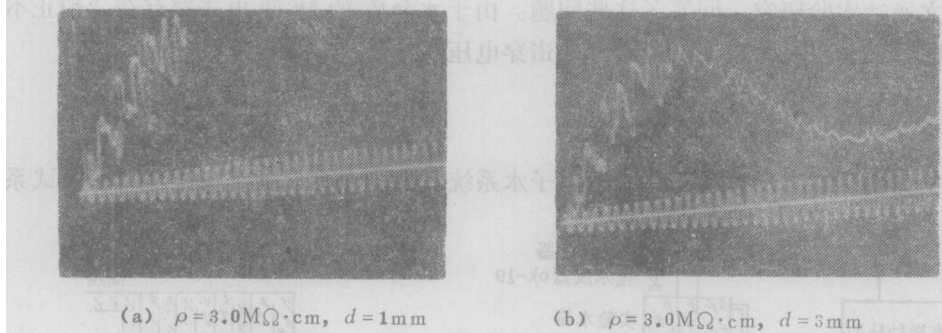


图 6

(3) 多针(+)——平板(地) 时标 $0.01\mu\text{s}$

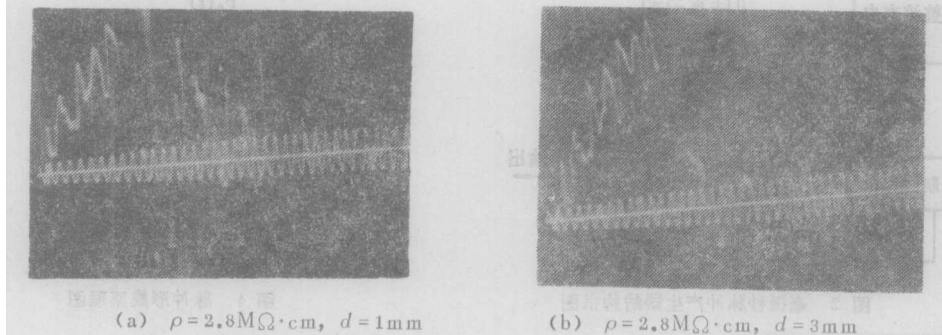


图 7

由于电极间电场强度对于三种电极结构有不同的几何分布，使得水分子极化有不同的取向分布，造成平板(-)+平板(地)电极结构的水介质最易击穿，多针(-)+平板(地)电极最难击穿^[1]。但是，毫微秒脉冲的实验结果恰恰相反，平板(+)+平板(地)电极除 $d=1\text{mm}$ 有一次击穿外，其他八次实验均未击穿，而且这次击穿是发生在进行一

表 1 毫微秒脉冲击穿数据*

电极	$d(\text{mm})$	$t_{eff}(\text{ns})$	$E_{max}(\text{kV/cm})$	M
平板+平板	1	375	321.2	0.37
	1	未		
	1			
	3			
	3	击		
	3			
	6			
	6	穿		
平均	6			
半球+平板	1	100	1192.9	0.72
	1	140	1147.1	0.78
	1	110	1238.8	0.77
	3	未		
	3			
	3	击		
	6			
	6	穿		
平均	6	117	1192.9	0.76
多针+平板	1	70	917.6	0.50
	1	75	917.6	0.51
	1	85	1009.4	0.59
	3	165	275.3	0.20
	3	135	321.2	0.22
	3	120	397.6	0.26
	6	210	122.4	0.10
	6	未击穿		
平均	6	123	565.9	0.34

* 1. 这里给出的是单纯实验数据；平均值是指已经击穿的数据之间的平均。

2. 表中定义的“击穿”是指放炮时水开关电极间出现导通火花，反之，则认为“未击穿”。

轮实验中的第一次，电极表面含有许多气泡，所以这次击穿并不反映真实情况。半球(+)+平板(地)电极的 $d=1\text{mm}$ 的三次实验都击穿了， $d=3\text{mm}$ 和 6mm 的均未击穿。而多针(+)+平板(地)电极的 $d=1\text{mm}$ 和 3mm 的六次实验均击穿， $d=6\text{mm}$ 的也有一次击穿。毫微秒击穿的这样的实验结果，是因为电极间的水电容的波阻抗小，使得产生器输出的脉冲能量很快地从电极间的水介质中泄漏，使脉冲电压上不去所致。图 8 是毫微秒脉冲实验电极间水电容的波阻抗 R_2 的示意。以平板(+)+平板(地)电极为例，当 $d=1\text{mm}$ 时，其电极水电容为：

$$C = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 A}{d} = 5.56\text{nF} \quad (1)$$

波阻抗 R_2 为：

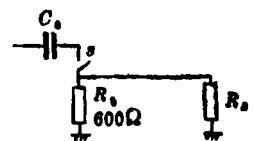


图 8 毫微秒脉冲实验波阻抗 R_2 示意

$$R_z = \frac{1}{\omega C} = 2.9 \Omega \quad (2)$$

而产生器输出端电阻 $R_0 = 600 \Omega$ 。可见，当开关 S 接通后，产生器的输出脉冲能量很快就从电极间的水中泄漏掉了。表 2 给出了亚微秒击穿的实验数据。从表中可以看出，有效作用时间均小于 0.50 微秒，电极间水电容的波阻抗也不大，但因 MARX 产生器的电容储能大，而且电路中还有一个 $R_c = 50 \Omega$ 的充电电阻（见图 9），因而水电容的波阻抗对能量的泄漏对击穿电压的建立影响不大。

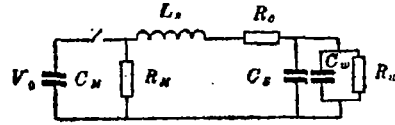


图 9 亚微秒实验装置的电路图

表 2 亚微秒击穿的实验数据

电极	实验次数 N	$\langle M \rangle_N$	$\langle t_{eff} \rangle_N (\mu s)$	$\langle E_{max} \rangle_N (kV/cm)$
平板 (-) + 平板 (地)	19	0.41 ± 0.02	0.37 ± 0.06	385.3 ± 13.9
半球 (-) + 平板 (地)	14	0.53 ± 0.03	0.44 ± 0.12	498.5 ± 42.0
多针 (-) + 平板 (地)	16	0.24 ± 0.04	0.31 ± 0.06	633.1 ± 19.0

装置的电路图中， C_M (MARX 电容) = $0.18 \mu F$ ； R_M (MARX 接地电阻) = $20 k\Omega$ ； L_s (杂散电感) = $2.3 \mu H$ ； C_s (杂散电容) = $0.1 nF$ ； $R_c = 50 \Omega$ ； C_w (水电容)； R_w (水电阻) = $\rho \cdot d / A$ (平板电极)。

马丁经验公式：

$$E_{max} t_{eff}^{1/3} = M / A^{1/10} \quad (3)$$

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 是水电容系统的品质因子。处理实验数据时，有效面积 A ，对于平板 (+) + 平板 (地) 电极是 πR^2 ，半球 (+) + 平板 (地) 电极是 $2\pi R^2/3$ ，多针 (+) + 平板 (地) 电极是外围六根针分布的圆面积。

取多针电极的实验数据，利用马丁经验公式计算出 M 值，从表 1 中看出， M 值相对于电极间距分为三组，从实验数据可看出， M 值是与电极间距 d 成反比，而同一结构的电极， M 值应是一常数，为此应对马丁经验公式进行修正，可定义一个基准间距 d_0 ，作为间距修正的度量，在其他任意间距 d 时，修正因子为 d/d_0 ，为此求得马丁公式的修正公式为：

$$E_{max} t_{eff}^{1/3} \frac{d}{d_0} = M / A^{1/10} \quad (4)$$

在特定条件下， $d_0 = 1mm$ ，经过修正后三组 M 值就趋向一致了。

这种正比关系又一次证明电容的泄漏作用，因为电容 C 反比于电极间距 d 。

3 结 论

(1) 水介质开关工作在毫微秒脉冲击穿区时，应考虑电极间水电容的波阻抗对触发脉冲能量的泄漏。

(2) 采用多针电极结构，可以抑制波阻抗对脉冲能量的泄漏，因而容易击穿。

(3) 毫微秒脉冲电压击穿的水介质开关的特性对马丁经验公式的适应性需要添加一个与电极间距有关的修正因子。

参 考 文 献

- [1] 李享生, 刘车波. 亚微秒负脉冲高电压击穿的水介质开关特性的实验研究. 国防科技大学报, 1988, 10(1): 76
- [2] 国防科大206实验研究室. 81—7M—01型强流相对论电子束加速器鉴定会文件. 1987

The Experimental Research on Breakdown Properties of Water Dielectric Switching under Nanosecond Positive Pulse Voltage

Li Xiangsheng Liu Chebo

(Department of Applied Physics)

Abstract

This research is a continuation of our experimental research on the breakdown properties of water dielectric switching under submicrosecond negative pulse voltage^[1]. The conclusions show that it is necessary to consider the leakage of the wave impedance of the water capacitance between electrodes to pulse energy of the trigger when the nanosecond pulse breakdown experiment is carried out.

Key words: nanosecond positive pulse, wave impedance of the water capacitance