

加压水介质耐 μs 级高电压击穿实验研究*

张自成, 杨建华, 张建德, 刘金亮, 蒲金飞, 刘振祥

(国防科学技术大学 光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘 要: 采用水介质同轴电极实验装置, 开展了 μs 级充电加压水介质击穿实验研究, 并对实验结果进行了分析和讨论, 结果表明: 在水介质正电极击穿类型的实验中, 常压下水介质击穿场强与 Martin 公式吻合。加压水介质击穿场强随静压的增加而增加, 其场强增幅与 Mirza 定性理论场强增幅的相对差别在 5% 以内。根据实验结果推导出了更为准确的水介质击穿场强随静压变化的关系式。对水介质加压, 将压缩电极表面气泡, 减少气泡数目, 从而可以提高水介质耐高电压击穿能力。

关键词: 加压水介质; 高电压击穿; μs 级充电

中图分类号: TL503 **文献标识码:** A

空芯变压器和水介质脉冲形成线型加速器是高功率微波驱动源的重要技术途径之一。高功率微波技术的发展要求高功率脉冲调制器具有功率高、体积小和实用性强的特点。早在 20 世纪 70 年代初, Mirza 和 Miller 就分别从理论和实验上证实, 水介质击穿场强 E 与静压 p 的 $1/8$ 次幂成正比, 即 $E \propto p^{1/8}$ ^[1,2]。由此可见, 加压可提高水介质击穿场强, 有利于水介质高功率脉冲形成线的小型化, 具有重要的现实意义。但是 Miller 公式给出的击穿场强在常压下与经典 Martin 公式^[3]和 Lupton 公式^[4]给出的结果差别很大, 所以有必要对水介质击穿加压效应进行进一步研究。国内潘亚峰等^[5]采用球板电极模型进行了百 ns 充电水介质击穿加压效应的研究, 实验结果证实了水介质加压技术的可行性和有效性, 只是场强随静压增加的幅度不够理想。而刘金亮等^[6]研究了 μs 级充电水介质同轴电容击穿, 对水介质击穿特性进行了一些探讨。

本文采用同轴电极试件进行水介质击穿加压效应实验。实验中, 绝缘介质采用介电常数大、击穿场强高和自我修复性能好的去离子水, 初级储能电容器通过变压器对水介质同轴电极试件进行充电, 充电时间为 μs 级, 实验结果可以为水介质脉冲形成线的设计提供参考。

1 实验装置及实验结果

1.1 实验装置

同轴电极击穿实验装置及其示意图如图 1 所示。实验装置主要由初级储能电容器 C_1 、高功率空芯变压器、触发开关 K 、试件、去离子水处理系统和电压测量系统组成。变压器原边和副边电感分别为 $4.13 \mu\text{H}$ 和 2.694mH , 耦合系数为 0.739 。试件为同轴电极, 其长度 $L=51.68 \text{cm}$, 内筒半径 $r_1=8.34 \text{cm}$, 外筒半径 $r_2=10.165 \text{cm}$, 电极间距 $d=1.825 \text{cm}$, 外筒有效电极面积(定义为承受场强超过峰值场强 90% 部分的电极面积) $A=1780 \text{cm}^2$, 电阻 $R=9.2 \text{k}\Omega$, 电容 $C=8.6 \text{nF}$ 。两电极均由不锈钢制成, 通过绝缘支撑板和螺钉衔接固定, 中间充满去离子水。去离子水经过水循环系统处理后, 实验前电阻率达到 $10\sim 20 \text{M}\Omega \cdot \text{cm}$ 。加压是通过对水介质加高压氮气实现, 以调节减压阀来控制所加压力, 静压大小为所加压力与常压之和, 常压指未加压情形, 对应静压为 101.325kPa 。出于经济、安全和实用的考虑, 加压不超过 $20 \times 101.325 \text{kPa}$ 。进行击穿实验时, 初级储能电容器 C_1 上初始电压为 20kV , 试件内筒充负电, 外筒接地。水试件击穿电压利用水电阻分压器测量, 如图 1(b)所示。

1.2 实验结果

取静压分别为 $(1, 3, 6, 13 \text{ 和 } 16) \times 101.325 \text{kPa}$, 进行加压水介质击穿实验, 击穿电压波形如图 2 所示。由图 2 可见, 随着静压的增加, 击穿电压和击穿时间(水试件从充电开始到击穿之间的时间)均增加。

表 1 给出了加压水介质在不同静压 p 下的击穿电压 U_{bd} 和有效时间 t_{eff} (定义为水试件上电压大于峰值电压 63% 部分所持续的时间), 其中 t 为充电时间(或击穿时间)。由表 1 可见, 随着静压 p 的增加, 水介质击穿电

* 收稿日期: 2004-11-26; 修订日期: 2005-03-04

基金项目: 国家 863 计划项目资助课题

作者简介: 张自成(1980—), 男, 河南夏邑人, 博士研究生, 主要从事脉冲功率技术研究; E-mail: successchang@163.com。

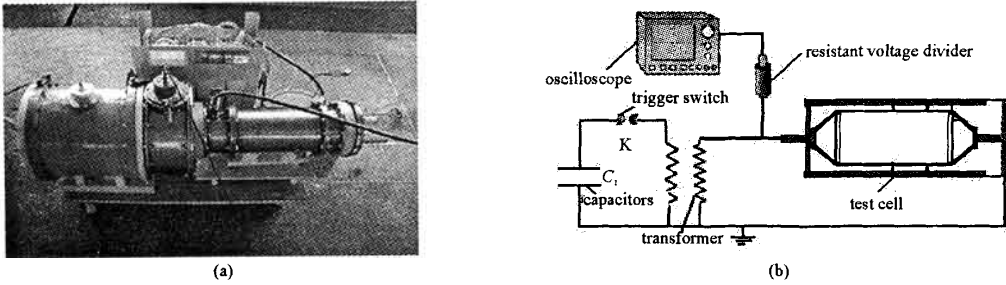


Fig. 1 Setup(a) and sketch map(b) of breakdown experiment for coaxial electrodes

图 1 同轴电极击穿实验装置(a)及其示意图(b)

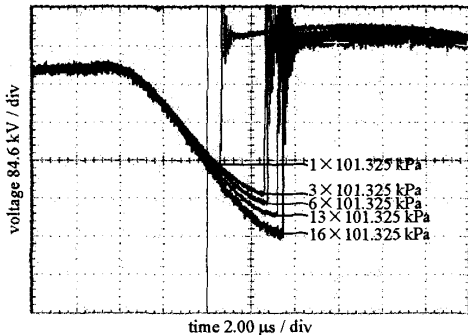


Fig. 2 Waveform of breakdown voltage for pressurized water dielectric

图 2 加压水介质击穿电压波形

压 U_{bd} 和有效时间 t_{eff} 均增加。

表 1 加压水介质击穿电压和有效时间

Table 1 Breakdown voltage and effective time for pressurized water dielectric

$p/101.325 \text{ kPa}$	U_{bd}/kV	$t/\mu\text{s}$	$t_{eff}/\mu\text{s}$
1	250.4	5.92	1.56
3	284.3	7.44	2.88
6	302.9	7.52	2.92
13	328.2	8.00	3.20
16	346.9	8.08	3.24

2 分析和讨论

水介质击穿场强定性理论和经验公式主要有 Martin 公式、Lupton 公式、Miller 公式和 Mirza 加压定性理论。对正电极击穿, Martin 公式为 $E = 300A^{-1/10} t_{eff}^{-1/3}$, Lupton 公式为 $E = 230A^{-0.058} t_{eff}^{-1/3}$, 随后 Miller^[2] 和 Fenneman 等^[3] 在实验中均发现, 当 t_{eff} 约大于 $2 \mu\text{s}$ 时, 击穿场强对有效时间 t_{eff} 的依赖关系由 $t_{eff}^{-1/3}$ 降低到 $t_{eff}^{-1/6}$, Miller 公式^[2] 为

$$E = \begin{cases} 330A^{-1/16} t_{eff}^{-1/3} p^{1/8}, & t_{eff} \leq 1 \mu\text{s} \\ 510A^{-1/16} t_{eff}^{-1/3} p^{1/8}, & t_{eff} \approx 2 \mu\text{s} \\ 570A^{-1/16} t_{eff}^{-1/6} p^{1/8}, & t_{eff} > 2 \mu\text{s} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $E(\text{kV}/\text{cm})$ 为击穿场强; $p(101.325 \text{ kPa})$ 为静压; $A(\text{cm}^2)$ 为有效面积; $t_{eff}(\mu\text{s})$ 为有效时间。

2.1 外筒正电极击穿

采用 ANSYS 模拟计算同轴电极两筒间的场强分布, 在常压下水介质击穿电压(即极间电压 $U_{bd} = 250.4 \text{ kV}$)情形的模拟结果如图 3 所示。由图 3 可知, 常压下水介质击穿时, 外筒(正电极)场强 $130.0 \text{ kV}/\text{cm}$ 稍大于 Martin 公式给出值 $122.4 \text{ kV}/\text{cm}$, 而内筒场强 $151.6 \text{ kV}/\text{cm}$ 远小于 Martin 公式给出值 $249.6 \text{ kV}/\text{cm}$, 故本文水介质击穿实验为外筒正电极击穿, 并且 ANSYS 模拟给出的击穿场强与 Martin 公式理论值相差 6%, 基本吻合。由图 3 还可看出, 外筒处的场强以中间部分均匀段最强。由于本实验是正电极击穿, 击穿主要发生在外筒均匀段部分。

同轴电极试件 $L/d = 28.3 \gg 1$, 因此在测出击穿电压 U_{bd} 之后, 水介质正电极击穿场强可以用理想无限长同轴线公式^[7] 方便地求出

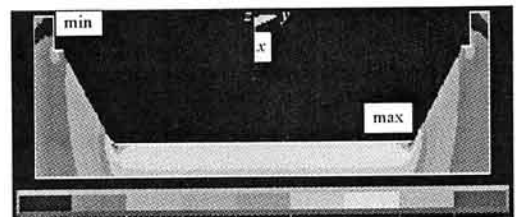


Fig. 3 Distribution of electrical field stress simulated with ANSYS

图 3 ANSYS 模拟同轴电极两筒间场强(kV/cm)分布

$$E_c = U_{bd} / [r_2 \ln(r_2/r_1)] \quad (2)$$

2.2 与击穿场强公式的比较

加压水介质击穿场强的实验和经验公式给出值及其相应的增幅如表 2 所示。表中, E_c, E_i, E_M, E_L 和 E_M 分别表示由实验结果、有效时间折合到 $1 \mu\text{s}$ 后的实验结果、Martin 公式、Lupton 公式和 Miller 公式^[2] 给出的击穿场强; Γ_i 和 Γ 分别表示加压水介质击穿场强相对于常压下击穿场强的理论和实验增幅; Δ 为 Γ_i 和 Γ 的相对差别, $\Delta = (\Gamma_i - \Gamma) / (1 + \Gamma)$; E_i 为将有效时间 t_{eff} 以 $t_{\text{eff}}^{-1/3}$ ($t_{\text{eff}} \leq 2 \mu\text{s}$) 或者 $t_{\text{eff}}^{-1/6}$ ($t_{\text{eff}} > 2 \mu\text{s}$) 的关系折合到 $1 \mu\text{s}$ 后的击穿场强(即消除了有效时间差异的击穿场强)。

由表 2 可见: 常压下水介质击穿场强与 Martin 公式和 Lupton 公式计算的击穿场强基本吻合; 加压水介质击穿场强随静压 p 的增加而增加, 相对差别 Δ 在 5% 以内。

表 2 加压水介质击穿场强的实验和理论值及其相应的增幅

Table 2 Experimental and theoretical breakdown stress and their additional magnitude for pressurized water dielectric

$p/101.325 \text{ kPa}$	$t_{\text{eff}}/\mu\text{s}$	E_c /($\text{kV} \cdot \text{cm}^{-1}$)	E_M /($\text{kV} \cdot \text{cm}^{-1}$)	E_L /($\text{kV} \cdot \text{cm}^{-1}$)	E_M /($\text{kV} \cdot \text{cm}^{-1}$)	E_i /($\text{kV} \cdot \text{cm}^{-1}$)	$\Gamma_i/\%$	$\Gamma/\%$	$\Delta/\%$
1	1.56	124.5	122.4	127.5	275.5	144.4	0	0	1.7
3	2.88	141.3	—	—	343.4	168.6	16.7	14.7	3.5
6	2.92	150.6	—	—	373.6	180.0	24.7	25.1	1.4
13	3.20	163.2	—	—	405.3	198.1	37.2	37.8	1.3
16	3.24	168.2	—	—	415.1	204.6	41.7	41.4	2.0

水介质击穿场强与静压 p 的关系如图 4 所示, 图中, 实线和虚线分别对应实验拟合结果和 Mirza 定性理论(亦即 Miller 公式)给出结果。其中 E_0 和 E_i 分别为常压和加压下有效时间折合到 $1 \mu\text{s}$ 后的击穿场强。由图 4 可见, 实验拟合(实线) $E_i/E_0 \sim p$ 关系为一直线, 与 Mirza 定性理论和 Miller 经验公式的关系(虚线)基本吻合。

由表 2 和图 4 可知: 在常压下, 实验结果与 Martin 公式和 Lupton 公式一致; 在进行加压实验时, 实验结果与 Mirza 定性理论和 Miller 经验公式预言的击穿场强对静压 p 的依赖关系一致, 即水介质击穿场强 $E \propto p^{1/8}$; 在加压实验中, 实验击穿场强与 Miller 公式给出击穿场强在绝对数值上差别较大。Miller 公式在常压下与 Martin 公式和 Lupton 公式给出的击穿场强差别较大, 我们认为这是由于 Miller 公式中击穿场强系数和面积项不够准确, 电极表面的属性(如表面光滑程度)等因素影响击穿场强^[2,3], 从而造成 Miller 公式给出的结果偏大; 本实验给出的结果不仅在变化趋势上与 Miller 公式一致, 并且在数值上比 Miller 公式更准确, 因此我们认为, 在我们实验条件下(静压 p 不太高、有效时间为 μs 量级等), 水介质击穿场强随静压变化的公式应修正为

$$E = 300A^{-1/10} t_{\text{eff}}^{-1/N} p^{1/8} \quad (3)$$

式中: N 与有效时间 t_{eff} 有关, 当 $t_{\text{eff}} \leq 2 \mu\text{s}$ 时, $N=3$, 当 t_{eff} 大于 $2 \mu\text{s}$ 时, $N=6$ 。

2.3 物理机制

由 Jones 和 Kunhardt 水介质气泡击穿理论^[8~10] 可知, 触发水间隙放电的是微气泡, 给水试件加压将压缩电极表面的气泡, 减少微气泡的数目, 使得由于加热而形成气泡的过程变得更困难, 水介质击穿不易发生, 从而水介质耐高电压击穿能力得以提高。

3 结论

由实验结果和分析讨论可得: 加压水介质实验属正电极击穿类型的实验; 常压下水介质击穿场强为 124.5 kV/cm , 与 Martin 公式吻合; 更为准确的 $E \sim p$ 关系应为 $E = 300A^{-1/10} t_{\text{eff}}^{-1/N} p^{1/8}$; 加压提高水介质耐高电压击穿能力的主要机制为, 压缩电极表面气泡, 减少微气泡的数目。

参考文献:

[1] Mirza J S, Smith C W, Calderwood J H. Bubbles, pressure and pre-breakdown in insulating liquid[A]. Proceedings of the 4th International

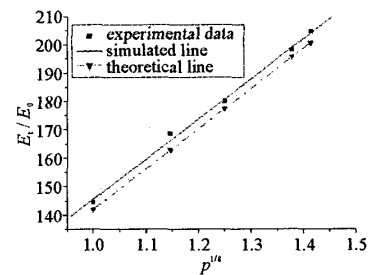


Fig. 4 Breakdown stress vs pressure
图 4 水介质击穿场强 E 与静压 p 的关系

- Conference on Conduction and Breakdown in Dielectric Liquids[C]. Dublin, 1972. 193.
- [2] Miller A R. High energy density, low impedance capacitors using pressurized water as a dielectric[A]. Fifth Symposium on Engineering Problems of Fusion Research[C]. San Diego, California, 1973. 471—474.
- [3] Fenneman D B, Gripslover R J. Experiments on electrical breakdown in water in the microsecond regime[J]. *IEEE Trans on Plasma Science*, 1980, 8(3): 130.
- [4] Eilbert R A, Lupton W H. Extrapolation of AWRE water breakdown data[R]. NRL Internal Report.
- [5] 潘亚峰, 张建德. 水介质传输线的耐高电压击穿技术的研究[D]. 长沙: 国防科技大学研究生院, 2002. (Pan Y F, Zhang J D. Investigation of electrical breakdown in water dielectric transmission line. Changsha; National University of Defense Technology, 2002)
- [6] 刘金亮, 李继健, 陈冬群, 等. μs 级充电时水介质同轴电容击穿实验研究[J]. *强激光与粒子束*, 2003, 15(3): 310—312. (Liu J L, Li J J, Chen D Q, et al. Experimental research of electrical breakdown for water dielectric coaxial capacitor with microsecond charging. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, 15(3): 310—312)
- [7] 沈龙根. 脉冲功率技术基础[M]. 长沙: 国防科技大学, 1989. (Shen L G. Introduction of pulse power technology. Changsha; National University of Defense Technology, 1989)
- [8] Espinosa J C, Gleeson Am. Dielectric breakdown of water[D]. Austin; Doctoral Dissertation of the University of Texas, 2000.
- [9] Jones H M, Kunhardt E E. The influence of pressure and conductivity on the pulsed breakdown of water[J]. *IEEE Trans on Dielectrics and Electrical Insulation*, 1994, 1(6): 1016—1025.
- [10] Jones H M, Kunhardt E E. Development of pulsed dielectric breakdown in liquids[J]. *J Phys D: Appl Phys*, 1995, 28(1): 178—188.

Investigation of high electrical breakdown for pressurized water dielectric with microsecond charging

ZHANG Zi-cheng, YANG Jian-hua, ZHANG Jian-de, LIU Jin-liang, PU Jin-fei, LIU Zhen-xiang

(College of Optoelectric Science and Engineering,

National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: By means of a coaxial apparatus, a high electrical breakdown experiment for pressurized water dielectric with microsecond charging was carried out. The experimental results were presented and analyzed. The conclusions are as follows: (1) breakdown for water dielectric initiates at the positive electrode; (2) observed breakdown stress at constant pressure is in good agreement with Martin formula; (3) primary mechanism to improve electrical breakdown strength for pressurized water dielectric is that, bubbles on the surface of electrodes is compressed by pressurization and the number of the bubbles is reduced.

Key words: High electrical breakdown; Pressurized water dielectric; Microsecond charging