

文章编号: 1001-4322(2005)03-0463-03

电极表面光滑程度对水介质高电压击穿的影响*

张自成, 张建德, 杨建华, 周 相

(国防科学技术大学 光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘 要: 采用水介质同轴实验装置, 改变电极表面的光滑程度, 在 μs 级充电时进行水介质击穿实验, 并对实验结果进行了分析和解释。结果表明: 抛光电极表面可有效提高水介质耐高电压击穿能力; 表面粗糙度为 $0.4\sim 0.8\ \mu\text{m}$ 的抛光电极表面的击穿场强比表面粗糙度为 $1.6\sim 3.2\ \mu\text{m}$ 的粗糙抛光电极表面, 更符合 Martin 公式。电极表面光滑程度的改善, 使阴极场致发射电流减弱进而击穿延迟时间变长, 气泡也更难以附着在光滑的电极表面, 从而可以提高水介质耐高电压击穿能力。

关键词: 水介质; 高电压击穿; μs 级充电; 电极表面光滑程度

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, 要求高功率脉冲形成线具有输出功率高、体积小和实用性强的特点。19 世纪 60 年代早期, Martin 进行了经典 JCM 水击穿实验, 观察到水介质击穿场强 E 跟有效时间 t_{eff} 、有效面积 A 有关, 随后的 Miller 验证了 Mirza 理论预言的 E 跟水静压 p 的关系: $E \propto p^{1/8}$ [1,2], Fenneman 等指出 E 还跟电极材料和电极表面的光滑程度等因素有关 [3]。我们进行了 μs 级充电水介质同轴电极击穿实验 [4], 验证了 Martin 公式, 证实了 $E \propto p^{1/8}$, 给出了击穿场强的表达式 $E = 0.3A^{-1/10} t_{\text{eff}}^{-1/3} p^{1/8}$, 这不同于 Miller 公式 [1], 分析认为是由于 Miller 公式中击穿场强系数和面积项不够准确, 加之电极材料和表面光滑程度等因素也影响击穿场强 [2,3]。

本文采用同轴电极试件, 进行水介质击穿实验, 研究电极表面光滑程度对水介质击穿的影响。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好的去离子水, 初级储能电容器通过变压器对水介质同轴试件进行充电, 击穿时间为 μs 级, 实验结果可以为实际水介质脉冲形成线的设计提供参考。

1 实验装置

同轴电极击穿实验装置如图 1 所示, 图 2 为其示意图。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 $2.694\ \text{mH}$, 耦合系数为 0.739 。试件为同轴传输线, 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 $d = 1.825\ \text{cm}$, 有效面积 $A = 1780\ \text{cm}^2$, 电阻 $R = 9.2\ \text{k}\Omega$, 电容 $C = 8.6\ \text{nF}$ 。两电极均由不锈钢组成, 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 $10\sim 20\ \text{M}\Omega \cdot \text{cm}$ 。

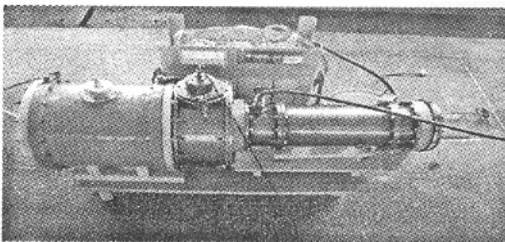


Fig. 1 Setup of breakdown experiment for coaxial electrodes

图 1 同轴电极击穿实验装置

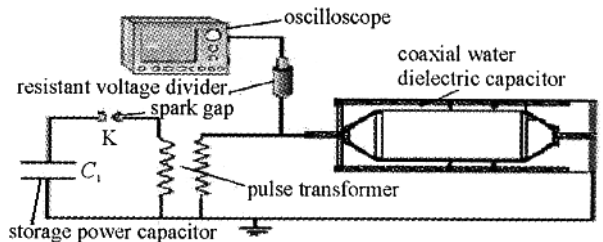


Fig. 2 Sketch map of breakdown experiment for coaxial electrodes

图 2 同轴电极击穿实验示意图

电极表面的光滑程度(用表面粗糙度 R_a 标识)通过两种不同的抛光方法来实现对比: (1) 先用 80 #, 120 # 等型号的粗砂盘打磨, 再用 600 # 细砂盘打磨——粗糙抛光 ($R_a = 1.6\sim 3.2\ \mu\text{m}$); (2) 按 (1) 所述操作打磨后, 再用尼龙片抛光, 然后用羊毛绒片上蜡抛光——抛光 ($R_a = 0.4\sim 0.8\ \mu\text{m}$)。

* 收稿日期: 2004-06-21; 修订日期: 2004-11-15

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, 硕士研究生, 主要从事脉冲功率技术研究; E-mail: Successchang@163.com。

2 实验结果

同轴电极试件充电峰值电压 V_c (简称充电电压) 分别为 225 kV 和 300 kV, 电极表面粗糙度 R_a 在 $1.6 \sim 3.2 \mu\text{m}$ 和 $0.4 \sim 0.8 \mu\text{m}$ 两种情形下, 用图 1 所示的实验装置进行击穿实验, 试件中内筒充负电, 外筒接地, 水介质最大击穿电压的波形如图 3 所示。

由图 3 可见: 抛光与粗糙抛光相比, 击穿电压和击穿时间(水试件上电压由零到最大值之间的时间)均增加; 当充电电压增加时, 击穿电压增加, 击穿时间减小。

表 1 给出了在抛光和粗糙抛光(不同 R_a) 不同充电电压下的水介质最大击穿电压 U_{bm} 和有效时间 t_{eff} (电压波形中大于最大电压的 63% 的电压的持续时间), 其中 t_b 为击穿时间。

由表 1 可见: 抛光与粗糙抛光相比, 击穿电压和有效时间均增加; 当充电电压增加时, 击穿电压增加, 而有效时间减小。

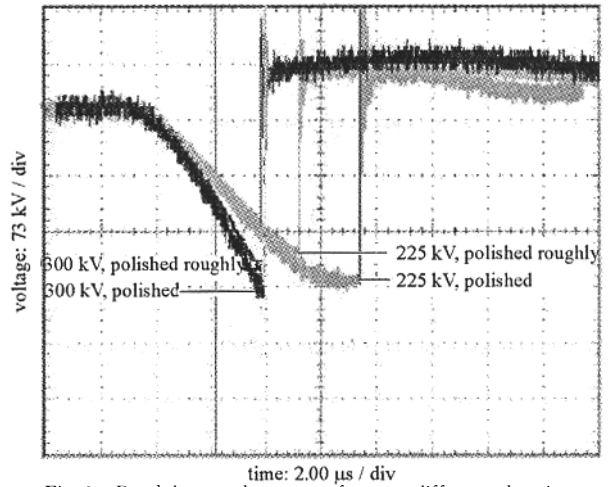


Fig. 3 Breakdown voltage waveform on different charging voltage and different polished surface of electrodes

图 3 不同电极电极光滑程度下水介质击穿电压波形

表 1 不同表面粗糙度 R_a 下水介质击穿电压和有效时间

Table 1 Breakdown voltage and effective time for water dielectric on different R_a

$R_a/\mu\text{m}$	V_c/kV	U_{bm}/kV	$t_b/\mu\text{s}$	$t_{\text{eff}}/\mu\text{s}$
1.6~3.2	225	185.4	6.40	2.28
0.4~0.8	225	224.8	8.88	4.16
1.6~3.2	300	11.7	4.96	1.36
0.4~0.8	300	243.8	5.12	1.56

3 分析和讨论

由文献[4]可知, 本实验为(外筒)正电极击穿, 并且正电极的场强可用理想无限长同轴线公式 $E_{\text{ex}} = U_{\text{bm}}/[r_2 \ln(r_2/r_1)]$ 近似计算。在标准大气压和标准温度下, 水介质正电极击穿场强可用经典 Martin 公式 $E_{\text{th}} = 0.3A^{-1/10}t_{\text{eff}}^{-1/3}$ 理论计算, 其中 A 为有效面积(承受场强超过最大场强的 90% 的电极面积)。而 Miller 和 Fenneman 等[2,3]发现当 $t_{\text{eff}} > 2 \mu\text{s}$ 时, 击穿场强对 t_{eff} 的依赖关系由 $t_{\text{eff}}^{-1/3}$ 减弱到 $t_{\text{eff}}^{-1/6}$ 。

3.1 电极表面的光滑程度对水介质击穿的影响

抛光和粗糙抛光电极表面(不同 R_a), 水介质击穿场强的实验和理论值分别如表 2 所示。其中, 相对差别 $\Delta = (E_{\text{ex}} - E_{\text{th}})/E_{\text{th}}$ 。

由表 2 可知: (1) 相同的充电电压, 抛光的击穿场强比粗糙抛光高 15%~20%, 同时有效时间也增加; (2) 抛光、充电电压 225 kV 下的击穿场强比粗糙抛光、充电电压 300 kV 下的击穿场强还要高; (3) 抛光时的击穿场强跟 Martin 公式吻合得更好。粗糙抛光时的击穿场强比理论值低 10%~20%, 而抛光时的击穿场强跟理论值仅相差 1%。

表 2 不同表面粗糙度 R_a 下水介质击穿场强的实验和理论值及其相对差别

Table 2 Experimental and theoretical breakdown stress and their relative difference for water dielectric on different R_a

$R_a/\mu\text{m}$	V_c/kV	$t_{\text{eff}}/\mu\text{s}$	$E_{\text{ex}}/(\text{kV} \cdot \text{cm}^{-1})$	$E_{\text{th}}/(\text{kV} \cdot \text{cm}^{-1})$	$\Delta/\%$
1.6~3.2	225	2.28	92.2	107.8	-14.5
0.4~0.8	225	4.16	111.8	111.9	-0.1
1.6~3.2	300	1.36	105.2	128.1	-17.8
0.4~0.8	300	1.56	121.2	122.4	-1.0

总之, 电极表面光滑程度越好, 水介质击穿场强越高, 即水介质耐高电压击穿的能力越强。由此可见, 抛光电极表面可以作为增强水介质耐高电压击穿能力的一种行之有效的技术途径(可提高水介质击穿电压 15%~20%), 是脉冲形成线小型化的一种有效方法。

3.2 物理解释

Jones 和 Kunhardt 在 μs 和亚 μs 量级上的水介质气泡击穿理论^[5,6]认为,电子碰撞电离发生在气泡里。根据击穿延迟时间 $\tau_{\text{bd}} = \tau_{\text{nuc}} + \tau_{\text{ex}} + \tau_{\text{ar}} + \tau_{\text{r}}$,水介质击穿进程可分为以下4个步骤:(1)由于阴极场致发射电流的加热,在水介质阴极表面突起部分形成晶核(未来的气泡)— τ_{nuc} ;(2)由于连续场致发射电流的加热使其密度随时间逐渐减小直到临界值 N_c ,电子碰撞并发生电离— τ_{ex} ;(3)电子雪崩增长(并转化为离子化波前)开始,直到受到空间电荷场的阻碍— τ_{ar} ;(4)雪崩阻碍开始到维持离子化波前发展的火花通道形成— τ_{r} 。而且,击穿延迟时间 τ_{bd} 主要取决于 τ_{nuc} 。

电极表面光滑程度的改善,一方面使阴极表面场致发射电流减弱,其加热产生晶核的时间 τ_{nuc} 增加,进而使击穿延迟时间 τ_{bd} 变大,另一方面可抑制气泡的形成,气泡难以附着在光滑的电极表面,从而降低介质击穿的可能性。

4 结 论

由实验结果和讨论可得出如下结论:电极表面的抛光可有效提高水介质击穿场强;电极表面粗糙度在 $0.4 \sim 0.8 \mu\text{m}$ 时水介质击穿场强与 Martin 公式吻合得很好;电极表面光滑程度的改善,可以使阴极表面场致发射电流减弱和气泡难以附着在光滑的电极表面,从而可以提高水介质耐高电压击穿能力。

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 Conference on Conduction and Breakdown in Dielectric Liquids[C]. Dubin, 1972. 193.
- [2] Miller A R. High energy density, low impedance capacitors using pressurized as a dielectric[A]. Fifth Symposium on Engineering Problems of Fusion Research[C]. San Diego, California;1973. 471—474.
- [3] Fenneman D B, Gripshover R J. Experiments on electrical breakdown in water in the microsecond regime[J]. *IEEE Trans on Plasma Science*, 1980, **8**(3):130.
- [4] Zhang Z C, Zhang J D. The investigation of high electrical breakdown for pressurized water dielectric with microsecond charging[A]. Proceedings of 15th International Conference on High-Power Particle Beams[C]. St. Petersburg;2004.
- [5] 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.
- [6] Jones H M, Kunhardt E E. Development of pulsed dielectric breakdown in liquids[J]. *J Phys D:Appl Phys*, 1995, **28**(1):178—188.

Influence of polished surface of electrodes on high electrical breakdown for water dielectric

ZHANG Zi-cheng, ZHANG Jian-de, YANG Jian-hua, ZHOU Xiang

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

Abstract: A coaxial electrode experimental apparatus with water dielectric capacitor was set up, high voltage breakdown experiments for polished and unpolished surface of electrodes with microsecond charging were respectively carried out. The experimental results are shown as follows: (1) polished surface of electrodes effectively improves the capacity to maintain the high electrical voltage for water dielectric; (2) breakdown stress for surface polished electrode of roughness ($0.4 \sim 0.8 \mu\text{m}$) is in better agreement with Martin formula than roughly polished one ($1.6 \sim 3.2 \mu\text{m}$); (3) primary mechanism to increase the breakdown stress of water dielectric is that, field emission currents to heat the bubble become weak on the cathode for polished surface of the electrodes and the time lag to breakdown is increased, moreover, it is more difficult to result in bubbles on the polished surface of electrodes.

Key words: Water dielectric; High electrical breakdown; Microsecond charging; Polished surface of electrodes