

文章编号: 1001-4322(2006)06-1053-04

液体介质快脉冲电压下击穿特性研究*

张晋琪^{1,2}, 蒋兴良², 陈志刚¹

(1. 中国工程物理研究院 应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900; 2. 重庆大学 高电压与电工新技术教育部重点实验室, 重庆 400044)

摘 要: 设计了液体介质快脉冲击穿试验装置和电压电流测量系统, 研究了重复频率、电极形状及电极间距与介质击穿场强、击穿电压和击穿时延等击穿特性参数的关系, 比较了变压器油、十二烷基苯、蓖麻油三种典型液体绝缘介质在直流及快脉冲电压作用下的绝缘性能。结果表明, 短脉冲持续时间下液体绝缘材料有异常高的击穿场强; 重复脉冲串作用下的击穿场强比单个脉冲下明显减小, 重复频率 2 kHz 时击穿场强减小了约 30%; 电极头半径大小对击穿也有影响, 半径 $R=5$ mm 时, 击穿电压最高; 击穿时延随击穿场强减小而变长, 在其他条件相同的情况下, 测得击穿时延随机波动; 蓖麻油的快脉冲电压绝缘性能最好, 变压器油次之。

关键词: 快脉冲; 液体介质; 击穿特性; 脉冲功率技术

中图分类号: TM89 **文献标识码:** A

液体绝缘介质通常使用在脉冲功率技术中。然而, 绝缘液体本身的化学复杂性和多样性, 增加了超宽带快脉冲电压下研究介质击穿机理的难度。介质击穿尚无统一的击穿理论和公认的经验公式。

对于同轴结构的超宽带高功率微波(UWB HPM)源, 横向电场在很大程度上限制了器件的实体尺寸。然而, 为系统小型化, 最佳设计是外径和内径的比值最小化, 但同时又要保证不发生电击穿, 因而对绝缘的要求高。目前 UWB HPW 系统正朝大功率、高重复频率、短脉宽及轻量化方向发展, 而这些指标的实现主要依赖于系统的绝缘特性。

1 实验设施

1.1 实验平台

液体介质击穿试验装置及测量系统见图 1, SOS 脉冲源经 DBD 脉冲压缩后产生前沿小于 2.5 ns, 脉宽约 8 ns、电压约 160 kV 的快脉冲, 重复频率从单次至约 2 kHz 可调。

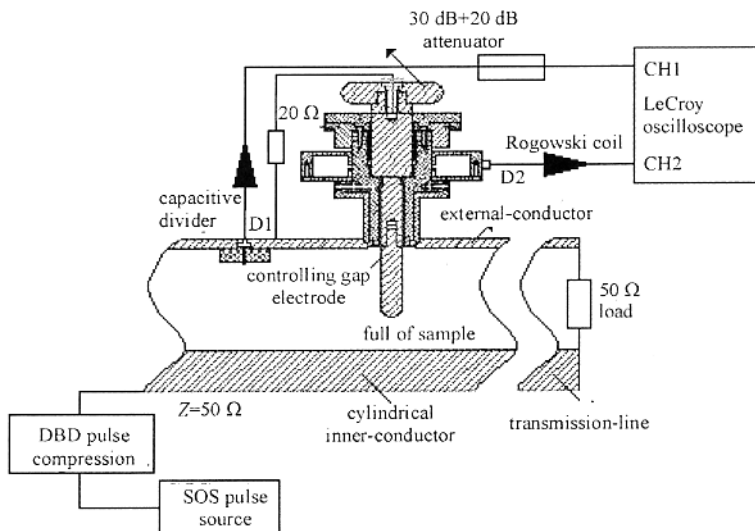


Fig. 1 Breakdown test apparatus and measurement system

图 1 击穿试验装置及测量系统

分布式电容分压器安装在试验间隙前, 经标定分压比为 550, 用它测量电压信号。自积分式罗氏线圈测量击穿电流, 其频率响应可达 635 MHz, 灵敏度 0.158 V/A, 前沿小于 1 ns。试验装置设计阻抗与传输线和负载

* 收稿日期: 2005-10-21; 修订日期: 2006-03-22

基金项目: 国家 863 计划项目资助课题

作者简介: 张晋琪(1979—), 女, 硕士, 现从事脉冲功率技术的研究及应用工作; zjq279@sina.com。

阻抗一致,可以达到良好的匹配。间隙距离的测量采用了千分尺的原理(即利用螺纹和刻度盘相结合的方法),可以准确读出间距,精确至 0.02 mm。

1.2 实验方法

快脉冲电压作用下液体绝缘材料击穿特性的研究,选用了变压器油、十二烷基苯和蓖麻油三种绝缘介质,设计了半径分别为 1,3,5 和 7 mm 四种型号的可调隙半球形电极头,研究其对介质击穿的影响。通过调节 SOS 源输出脉冲的重复频率,观测介质击穿场强的变化。

在每组实验后更换新电极头及绝缘油,并将内导体在水平方向沿顺时针旋转至光滑侧面,以便先前击穿受损的部位离开新的有效电极区(内导体充当一个电极),保证实验数据真实有效。

2 实验所测波形

2.1 典型击穿电压电流波形

分布式电容分压器测得的电压信号较光滑,而罗氏线圈^[1]测得的电流信号叠加有干扰(见图 2)。干扰主要来源于空间电磁波的辐射耦合,因线圈要感应磁场,介质击穿过程中产生的辐射信号便会进入测量线圈,这是无法完全屏蔽的。

实验中以示波器指示的负脉冲电压波形的最小值点为击穿点,对应的电压值为击穿电压。击穿时延为击穿电压值从 10%到击穿点的时间,统计时分前沿时间和平顶时间两部分。如击穿发生在脉冲源输出波形的前沿,则称前沿击穿;如击穿发生在脉冲源输出波形的平顶,则称为平顶击穿。

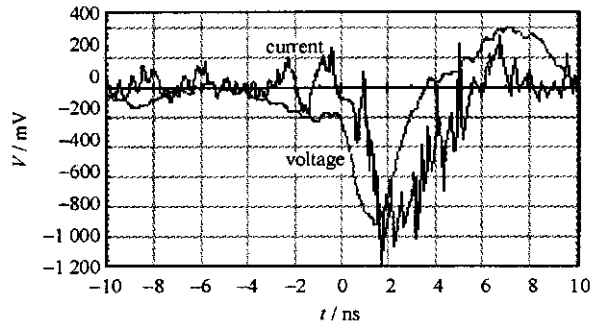


Fig. 2 Voltage and current breakdown waveform

图 2 击穿电压电流波形

2.2 从间隙击穿到未击穿的波形变化

脉冲源输出脉冲的平顶持续时间约 1 ns;图 3(b)所示的平顶时间为 950 ps。图 3 可见,当间距 d 逐渐增大到某值 d_0 (不同绝缘液体 d_0 值不同)时波形开始出现平顶,随后继续增大间隙波形经历从临界未击穿(半击穿状态)到完全未击穿的变化。直观上看,表现在波形后沿逐渐变长。

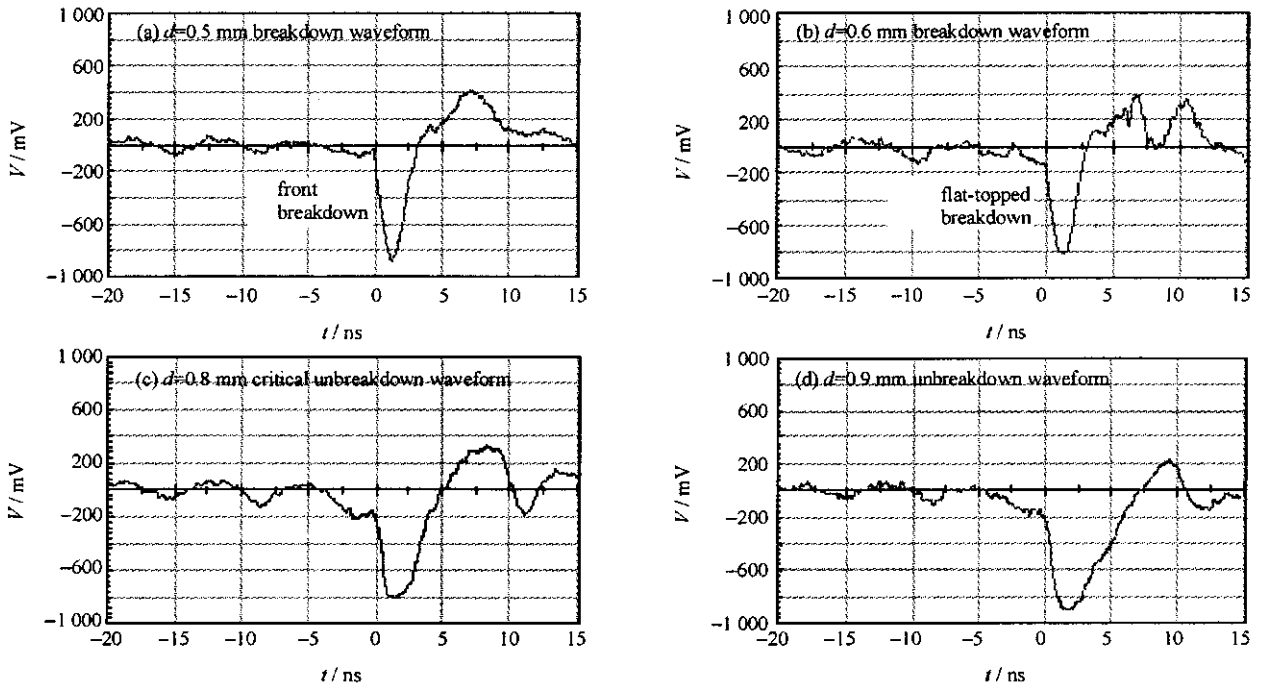


Fig. 3 Waveform variations

图 3 波形的变化

3 实验结果和分析讨论

3.1 电极头半径的影响

每组实验后观测电极表面受损情况,发现电极头半径 $R=1\text{ mm}$ 时,击穿点较集中,而且实验波形比较稳定。但击穿电压低(见图 4,图中每点的击穿电压是多次测量的均值)。电极头半径较小有利于产生较大的场致发射电流,增大了电极附近液体的温度(局部加热)和气泡形成^[2]的可能性,因而击穿电压低。击穿电压也并非电极头半径越大越高,图中所示半径 $R=5\text{ mm}$ 时,击穿电压最高。 $R=7\text{ mm}$ 时,电极表面击穿点较分散,在间距一定情况下测得击穿波形抖动大,并且击穿电压比 $R=5\text{ mm}$ 时略低。这是由于电极半径 $R=7\text{ mm}$ 时,增大了有效击穿面积,从而减小了击穿场强。可见,随着半球形电极半径的增大,击穿电压不断提高,但提高击穿电压的作用在减小。

3.2 重复脉冲串作用下的击穿

快脉冲下液体绝缘介质的击穿场强远远高于直流作用下的击穿场强(见表 1)。蓖麻油的直流击穿场强非常低,然而快脉冲击穿时却有较高的击穿场强。实验中采用的十二烷基苯直流下测得的击穿场强比变压器油高,但纳秒快脉冲下却显示出最差的绝缘性能。

表 1 直流及快脉冲电压下三种介质的击穿场强

Table 1 Breakdown field of three dielectric materials under DC and short impulse conditions

	DC and short pulse	DC	single pulse	2 kHz repetitive frequency
breakdown	transformer oil	14.3	269.0	204.3
field/(kV · mm ⁻¹)	dodecylbenzene	18.6	254.0	183.7
	castor oil	3.3	323.9	264.5

采用同一型号电极头(半径 $R=5\text{ mm}$),并保持间距 $d=0.5\text{ mm}$ 不变,测量三种绝缘油不同重复频率下的击穿场强。对测得的数据进行分析见图 5,蓖麻油的击穿场强明显高,变压器油次之,十二烷基苯最低。这可以基于介质材料的物理性能来解释:十二烷基苯吸湿性强,吸入的水分子降低了击穿场强;而蓖麻油属于粘稠性液体,可以有效地束缚为建立击穿通道所需的高能电子(快脉冲击穿主要是电击穿作用^[3]),从而增大了击穿场强。

重复频率小于 100 Hz 时击穿强度随频率的变化较明显;高频率区($100\sim 2\ 000\text{ Hz}$),击穿强度随重复频率变化很小。与单个脉冲相比重复脉冲串作用下的击穿场强明显减小。重复频率 2 kHz 时击穿场强减小了约 30% 。这归因于先前击穿事件所残留的带电微粒和中性受激分子的存在^[4],重复放电期间产生了大量的亚稳态分子,随着脉冲频率的增加,数量增大。而且亚稳态分子很容易发生电离,使得液体介质电导率增大,从而减小了击穿场强。

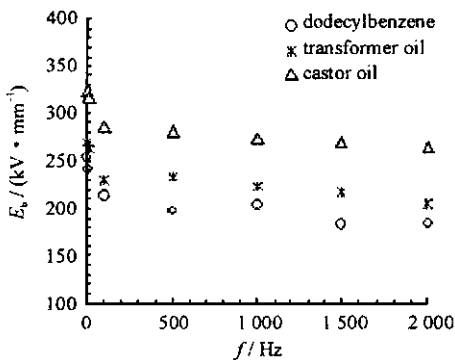


Fig. 5 Effect of repetitive pulse burst on breakdown field

图 5 重复频率对脉冲击穿场强的影响

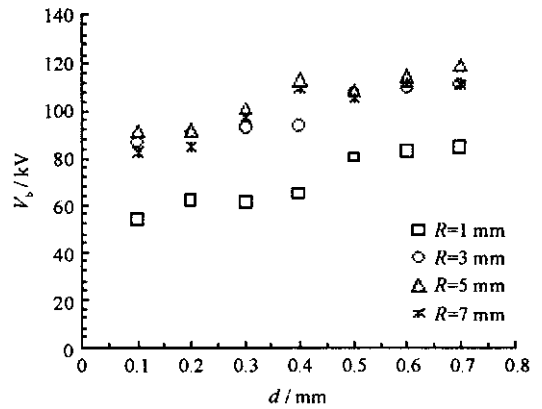


Fig. 4 Breakdown characteristic of transformer oil for different electrode tip

图 4 不同电极头时变压器油的击穿特性

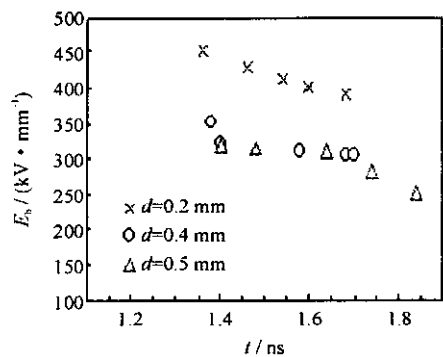


Fig. 6 Castor oil-breakdown field vs breakdown time

图 6 蓖麻油在不同间距下击穿时间与击穿场强的关系

3.3 击穿时延的测量

通过比较绝缘油击穿场强与击穿时延在三个不同间距 $d(0.2, 0.4, 0.5 \text{ mm})$ 下的实验结果(如图 6 所示, 蓖麻油的为前沿击穿时测得)得出: 击穿场强高时击穿时延短, 而击穿场强较低时击穿时延变长。在对相同间距、相同外施脉冲下击穿时延进行反复测量的结果显示: 击穿时延随机波动。每个击穿过程都以其独自的速度发展^[5], 在金属和液体介质交界处, 电子的有效注入在很大程度上影响了击穿速度。说明相对外加电场来讲, 电极附近的局部增强场更大地控制着电子的活动。同时, 电极形状和实验温度对击穿时延也有影响^[5]。

4 结 论

短脉冲持续时间下液体绝缘材料有异常高的击穿场强。重复脉冲串作用下的击穿场强比单个脉冲下明显减小, 重复频率 2 kHz 时击穿场强减小了约 30%。电极头半径大小对击穿也有影响, 半径 $R=5 \text{ mm}$ 时, 击穿电压最高。击穿时延随击穿场强减小而变长, 在其他条件相同的情况下, 测得击穿时延随机波动。对选用的三种绝缘油击穿特性进行研究的结果显示, 蓖麻油的击穿场强最高。

参考文献:

- [1] 邹积岩, 段雄英, 张铁. 罗柯夫斯基线圈测量电流的仿真计算及实验研究[J]. 电工技术学报, 2001, 16(1): 81-84. (Zou J Y, Duan X Y, Zhang T. The simulating calculation and experimental research of Rogowski Coil for current measurement. *Electrician Technical Transaction*, 2001, 16(1):81-84)
- [2] Jones H M, Kunhardt E E. Nanosecond pre-breakdown and breakdown phenomena in water influence of pressure, conductivity, and ionic sheath[C]//Conference Record of the ICDL 12th International Conference on Conduction and Breakdown in Dielectric Liquids. Roma, Italy, 1996.
- [3] Jones H M, Kunhardt E E. Development of pulsed dielectric breakdown in liquids[J]. *J Phys D: Appl Phys*, 1995, 28: 178-188.
- [4] Lehr J M, Agee F J, Copeland R, et al. Measurement of the electric breakdown strength of transformer oil in the sub-nanosecond regime [J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 1998, 5(6):857-861.
- [5] Mazzetti C, Pompili M, Forster E O. Study of the time to breakdown in transformer oil under impulse conditions[J]. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, 1990, 25(6):1111-1116.

Characteristics study of short-pulsed dielectric breakdown in liquids

ZHANG Jin-qi^{1,2}, JIANG Xing-liang², CHEN Zhi-gang¹

(1. Institute of Applied Electronics, CAEP, P. O. Box 919-1015, Mianyang 621900, China;

2. Key Laboratory for High Voltage Engineering of Ministry of Education,

Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: The breakdown test apparatus with the measurement system of voltage and current signals in liquid dielectrics is designed; The relations of repetitive frequency, electrode shape and gap to some breakdown characteristics of liquid dielectrics such as breakdown field, breakdown voltage, breakdown time, and so on, are theoretically analyzed. And the insulating capabilities of three typical liquid dielectrics (transformer oil, dodecylbenzene, and castor oil) are compared, which indicates that a ranking of the withstand voltage rate for three materials, from smallest to largest, is dodecylbenzene, transformer oil and castor oil.

Key words: Short-pulsed; Liquid dielectrics; Breakdown characteristic; Pulse power technology