

文章编号: 1001-4322(2004)06-0787-04

压力水介质脉冲击穿实验研究*

梁 川, 章林文, 李 欣

(中国工程物理研究院 流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 为了提高水介质脉冲形成线的储能密度和减小大型加速器的脉冲功率系统几何尺寸, 实验研究了水在静压力作用下的耐压强度。简要介绍了液体绝缘介质的击穿机理, 在设计的水介质耐压实验装置上研究了去离子水介质在压力作用下的脉冲击穿特性。结果表明, 当压强由 0.1 MPa 增加到 0.7 MPa 时, 水的击穿场强由 25.3 MV/m 增加到 46.7 MV/m。

关键词: 脉冲击穿; 压力水介质; 击穿场强; 压强; 脉冲功率系统

中图分类号: TL503 **文献标识码:** A

对于直线感应加速器(LIA)的脉冲功率系统而言, 用水介质代替油介质作为脉冲形成线的储能介质, 是脉冲功率技术发展的一大技术突破, 从而拓展了低阻抗强流电子束加速器的研究和应用。同时水介质的脉冲击穿特性也得到了人们的广泛关注。水介质的击穿研究最早是在 20 世纪 60 年代中期由 J. C. Martin 和他的同事们完成的。他们得出如下结论: 在时间小于 $1\mu\text{s}$ 、电压约 1MV 下, 水的击穿场强由作用时间和有效作用面积共同决定。后来脉冲线的设计一般都用 Martin 的经验公式, 只是实际运行电压低于理论击穿值的 70%。在这样的运行电压下介质的最大有效储能密度^[1]约为 $50\text{kJ}/\text{m}^3$; 为了满足加速器的可靠运行, 大型加速器的脉冲功率系统显得较为庞大。为了进一步提高水线的储能密度和减小大型加速器的脉冲功率系统几何尺寸, 需要进一步提高水线的运行电压, 即提高水的耐压强度。本文针对这一问题, 设计了一套水介质耐压实验装置, 对去离子水介质在压力作用下的脉冲击穿特性进行了实验研究。

1 击穿机理

从 20 世纪 50 年代开始, 人们对液体绝缘击穿机理进行了广泛的理论和实验研究, 取得了显著成果。目前主要有两种击穿机理来描述液体的绝缘击穿: 一是电子雪崩流注理论^[2]; 二是气泡击穿理论。电子雪崩流注理论与气体放电中的雪崩流注理论类似^[3], 在高电压的作用下, 由场致发射产生电子, 电子在电场的作用下从阴极飞向阳极, 在飞行路径上与液体分子或原子发生碰撞而引起电离, 从而产生新的电子, 新的电子继续与液体分子或原子发生碰撞电离, 形成电子崩, 电子数将雪崩似地增加, 在阴阳极间形成电子通道, 导致液体绝缘介质击穿。气泡击穿理论^[4]则是指在强电场作用下, 液体介质中有传导电流流过, 这一电流虽然不大, 但它能使电极附近的液体受到加热, 并发生汽化, 从而在电极间隙中形成气体“小桥”, 刚开始气泡内的压力很大, 气泡

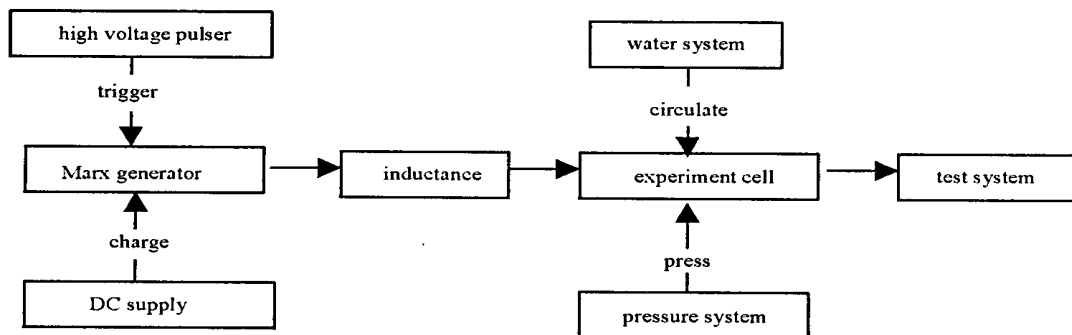


Fig. 1 Schematic of pulse breakdown of the pressured water
图 1 压力水介质脉冲击穿实验装置框图

* 收稿日期: 2003-06-05; 修订日期: 2004-02-08
基金项目: 国防科技基础研究基金资助课题
作者简介: 梁 川(1977—), 男, 四川蓬溪县人, 硕士研究生, 从事高功率脉冲技术研究; 绵阳 919-107 信箱。

就快速的扩张,直到气泡内压力减小到与气泡外液体压力相等。随着这个过程的重叠发生,就在电极间隙间形成了一个“气泡小桥”,沿着这个小桥进一步形成放电通道,发展为间隙击穿。实际应用中,以上两种击穿机理在液体介质的绝缘击穿中同时存在,只是在作用脉冲时间小于 μs 量级时电子雪崩流注理论占主导地位,而在作用脉冲时间为 μs 量级时气泡击穿理论占主导地位^[5]。

2 实验装置

压力作用下的去离子水脉冲击穿特性研究的实验装置框图如图 1 所示,它的等效电路如图 2 所示。由高压脉冲发生器输出触发信号触发已充电的 Marx 发生器,Marx 发生器经电感后输出一个衰减余弦波,作用在实验电极上,电压波形周期由电感来调节,实验波形周期约为 $5.25\mu\text{s}$ (考虑到现有 LIA 上 Blumlein 线的充电周期而选择这个周期,比如“神龙一号”LIA 的 Marx 发生器给形成线 Blumlein 充电周期约为 $6\mu\text{s}$,而 DARHT 加速器 Tesla 变压器给 Blumlein 线充电时间约为 $4.5\mu\text{s}$ ^[6])。电压波形的输出幅度由直流高压电源控制。实验电极为一球隙,是检验耐压情况的装置。电极球面半径为 50mm ,间距为 1.5mm ,放在一个水介质压力容器中。容器由水处理系统提供经过处理的去离子水,其电阻率可达 $6\text{M}\cdot\text{cm}$,可循环。水介质的压力由压力系统提供,压力系统是利用压力的传递效应,即在已充满去离子水的容器中充入溶解率极低的氮气,靠气压来提高水介质的压力。采用电容值比 Marx 发生器的串联电阻 C_M 小的电容 C_1 作为负载,目的是得到 A 点的电压增益,使作用在电极上的电压比 Marx 发生器本身输出的要高。球隙电极上的电压是由高压脉冲分压器经两级分压后馈入示波器获得的。

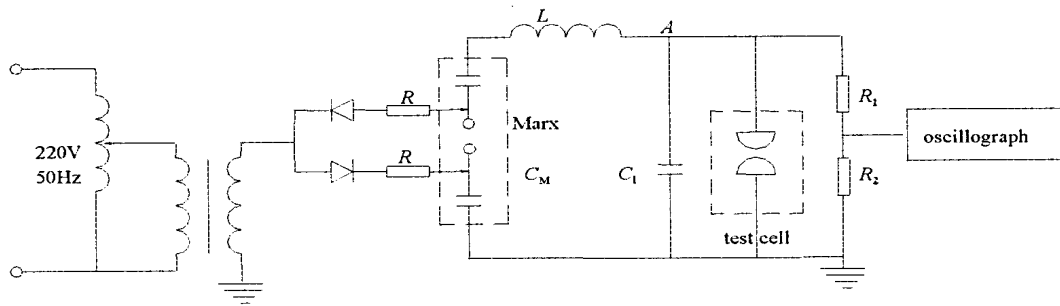


Fig. 2 Pulse breakdown circuit of the pressured water

图 2 压力水介质脉冲击穿实验等效电路示意图

3 理论计算

实验水介质球隙电容可通过下式^[7]计算

$$C = 4 \pi \epsilon_0 r \text{sh} \sum_{n=1}^{\infty} [\text{sh} n + \text{sh}(n-1)]^{-1} \quad (1)$$

式中: $\text{sh} = \pm(d^2 - 2r^2)/2r^2$, d 为两半球球心之间的距离; r 为半球的球半径,即实验半径电极, r 为 50mm , d 为 101.5mm ,可以计算出 $C = 816\text{pF}$ 。

球隙的等效电阻可由电阻公式 $R = l/s$ 来近似估计,由于间隙较窄,取 $l = 1.5\text{mm}$, $s = 78.54\text{mm}^2$ (近似取电场强度大于 $80\% E_{\text{max}}$ 那部分面积)来估算间隙电阻,当达 $6\text{M}\cdot\text{cm}$ 时,估算出间隙电阻约为 1.1M 。由于球隙电容 C 相对负载电容 C_1 要小得多,与电容负载并联就可忽略。电阻近似认为趋于无穷大,实验电路就近似为如图 3(a) 所示的一个 $C-L-C$ 谐振电路,图中 C_M 为 Marx 发生器的串联电容, L 为 Marx 发生器的回路电感, R_s 为 Marx 发生器球隙火花电阻、串联导线的总电阻, R_p 为并联等效电阻。图 3(b) 为 Pspice 软件模拟作用在间隙上的波形。对图 3(a) 所示电路可近似计算出负载电容 C_1 上的电压^[8]

$$V_{C_1}(t) = \frac{C_M V_m}{C_M + C_1} \left[\exp\left(-\frac{2C_1}{C_M + C_1} t\right) - \exp\left[-\left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2}\right) t\right] \cos t \right] \quad (2)$$

式中: $\gamma_1 = R_s/2L$; $\gamma_2 = 1/2 R_p C_1$; $\omega = \sqrt{(C_M + C_1)/LC_1 C_M}$; V_m 为电容 C_M 上的最大电压幅值。由 LC 回路的周期公式 $T = 2\pi\sqrt{LC}$,在电容负载为 50nF 时,电感值为 $21\mu\text{H}$ 时,周期 T 约为 $5.25\mu\text{s}$ 。图 3(b) Pspice 模拟结果与式(2)得到的衰减波形相吻合。

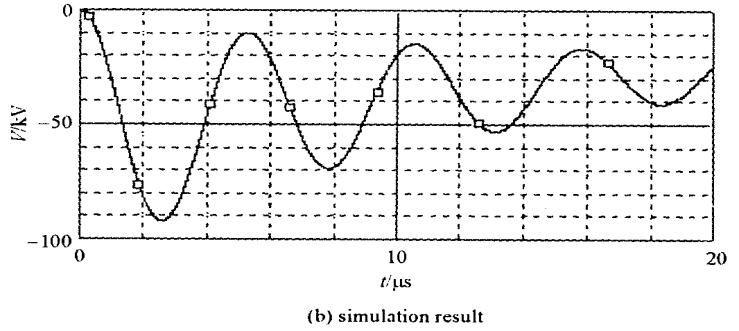
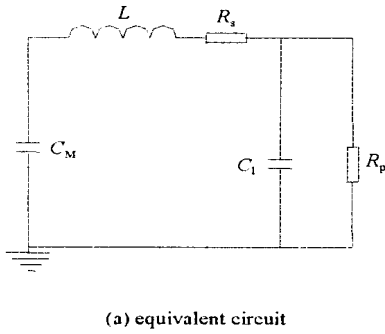


Fig. 3 Equivalent circuit and simulation result using Pspice

图 3 理论计算的等效电路和 Pspice 模拟波形

4 实验结果及分析

测得间隙上的电压波形如图 4 所示的衰减波形。由图 4 和图 3 (b) 可以看出实验测试波形与计算波形周期基本相同。当作用在间隙上的电压继续增大时,水介质的绝缘性能将被打破,绝缘击穿也就发生了,图 5 就是击穿后的波形图。实验压强变化范围为 0.1 ~ 0.7MPa,每个气压下重复多次击穿实验(实验多达 10 次以上),取 10 次击穿的平均电压作为该气压下的击穿电压值。实验测试去离子水的脉冲击穿场强与压强的关系

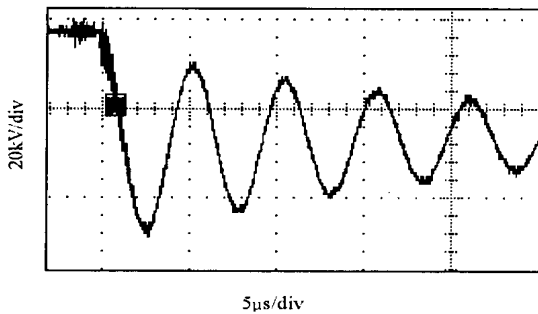


Fig. 4 Voltage waveform of the water gap

图 4 实验作用在间隙上的电压波形

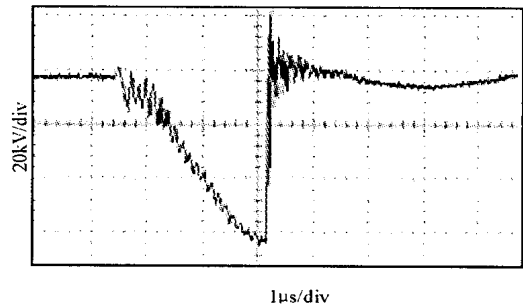


Fig. 5 Breakdown voltage waveform of the gap

图 5 间隙击穿后的电压波形

如图 6 所示。由图 6 可知,在压力的作用下,水介质的绝缘强度得到了显著的提高。随着水介质的压力的增大,水介质的脉冲击穿场强也随着增加;压力越大,击穿场强越高,在 0.7MPa 下,对于电阻率为 $6M \cdot cm$ 的去离子水,其击穿场强由 25.3MV/m 增大为 46.7MV/m。图 6 中水介质在压力作用下击穿场强提高的趋势是一致的,但在相同压力下其变化趋势又有差异,这与液体介质绝缘击穿的复杂性有关。在压力作用下水介质的击穿场强均比由 J. C. Martin 的经验公式估算的要高。对于非均匀场中水的击穿场强计算的 Martin 公式为

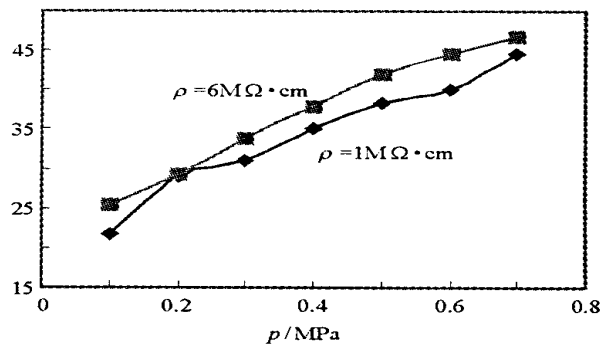


Fig. 6 Relation between breakdown stress and pressure

图 6 实验测试水的脉冲击穿场强与压强的关系

$$\begin{cases} E_+ = 230 A^{-0.06} t_{eff}^{-1/3} \\ E_- = 560 A^{-0.07} t_{eff}^{-1/3} \end{cases} \quad (3)$$

式中: E_+ , E_- 是击穿场强 (kV/cm), 与极性相关; A 为场强大于最大场强的 90% 的那部分电极面积 (cm^2); t_{eff} 定义为电压高于最大电压的 63% 的时间 (μs), 对于 $u_0(1 - \cos t)$ 形状的电场波形有 $t_{eff} = 0.208 T^{1/6}$, T 为电压波周期。实验是正极性情况, $A = 0.51cm^2$, $t_{eff} = 1.092\mu s$, 计算出其击穿场强 $E_+ = 23.3MV/m$, 与实验测得 0.1 MPa 下的击穿场强 25.3MV/m 基本吻合。但比同样条件下水介质在 0.7MPa 时的击穿场强提高了近一倍。

现在从理论上分析一下压力对脉冲击穿场强的影响。由前面击穿机理的气泡击穿理论可知,当电极附近由于焦耳热形成气泡后,刚开始气泡内的压力很大,气泡就快速的扩张,直到气泡内压力减小到与气泡外液体

压力相等,同时由于气体的击穿场强比液体低得多,所以气泡先开始电离,这又使气泡温度升高、体积膨胀,电离将进一步发展;而带电粒子又撞击液体分子,使液体又分解出气体,扩大气体通道。如果电离的气泡在电场中堆积成气体“小桥”,击穿就在此通道发生了。然而由于水介质的压力的增大,它阻碍了气泡的进一步扩张,同时它也提高了气泡游离的初始场强,从而提高了介质的击穿场强。

从图 6 的实验结果我们还可以看出,在同样条件下,压力水介质的电阻率的变化对水介质的击穿电压的影响较小。这与常压下水介质的击穿场强几乎与电阻率无关^[9,10]是一致的。

5 结论和展望

通过实验得出如下结论:采用对去离子水施加压力的方法能显著提高水介质的耐压水平,从而提高以水为储能介质的储能系统的储能密度,也有利于水介质脉冲形成线的小型化;压力水介质的电阻率的变化对水介质的击穿场强的影响较小。由于实验条件等因素的制约,根据现阶段的实验工作,我们认为还有以下工作需要在今后的时间里继续进行:实验研究不同间隙距离下和不同周期脉冲作用下的压力水介质击穿特性;从实际应用的角度出发,应设计一套同轴电极进行实验研究。

参考文献:

- [1] Richard M A. High energy ,low impedance capacitors using pressurized water as dielectric[A]. Fifth Symposium on Engineering Problems of Fusion Research[C]. 1973. 471—474.
- [2] Sharbaugh A H, Devins J C, Rzaad S J. Progress in the field of electric breakdown in dielectric liquids[J]. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, 1978, **13**(4): 249—276.
- [3] 杨津基. 气体放电[M]. 北京:科学出版社,1983. (Yang J J. Gas discharge. Beijing: Science Press, 1983)
- [4] Watson P K. Electrostatic and hydrodynamic effects in the electrical breakdown of liquids dielectrics[J]. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, 1985, **20**(2): 395—399.
- [5] Sharbaugh A H, Devins J C, Rzaad S J. Review of past work on liquids breakdown[J]. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, 1980, **15**(3): 167—169.
- [6] Jaitly C N, Chen Y G, Coleman M D, et al. Design and testing of a multi-output 300kV prototype induction cell pulsed power supply for DARHT [A]. Proc 10th IEEE International Pulsed Power Conference[C]. 1995. 1412—1421.
- [7] 解广润. 高压静电场[M]. 上海:上海科学技术出版社,1987. (Xie G R. High voltage electric field. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1987)
- [8] 韩旻. 强电流脉冲放电技术[M]. 北京:清华大学出版社,1989. (Han M. Technology of high current pulse discharge. Beijing: Tsinghua University Press, 1989)
- [9] 米夏兹 A. 大功率毫秒脉冲的产生[M]. 邵贵荣译. 北京:原子能出版社,1982. (Mec A. Forming of high power millimicrosecond pulse. Translated by Shao G R. Beijing: Atomic Energy Press, 1982)
- [10] 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)

Research on the pulsed breakdown of the pressured deionized water

LIANG Chuan, ZHANG Lirwen, LI Xin

(Institute of Physics Fluid, CAEP, P. O. Box 919-107, Miangyang 621900, China)

Abstract: This paper presents the mechanism of the breakdown of liquids. Experimental apparatus of pulsed breakdown of the pressured deionized water has been set up. The relationship between the pulsed breakdown stress and the water pressure has been investigated. The results of test show that breakdown stress is significantly higher than that one might predict by currently accepted breakdown criteria when a hydrostatic pressure is applied to the water dielectrics. When the pressure of water changed from 0.1MPa to 0.7MPa, breakdown stress of water changed from 25.3MV/m to 46.7MV/m. Using the pressured deionized water as dielectrics, the energy density of the energy system could be enhanced notably and the size of the pulsed power system could be minified too.

Key words: Pulsed breakdown; Pressured deionized water; Breakdown stress; Pressure; Pulsed power system