

文章编号: 1001-4322(2006)08-1363-04

低预脉冲水介质多通道自击穿开关实验研究*

夏明鹤, 谢卫平, 李洪涛, 王玉娟, 杨自祥, 邓建军,
丰树平, 卫兵, 吴守东, 任靖, 孟维涛, 傅贞

(中国工程物理研究院 流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要: 在“闪光 II”上进行了水介质多针自击穿开关实验研究。开关由 2 个或 4 个开关间隙、预脉冲屏蔽板及其支撑结构组成。介绍了开关结构及其集中参数等效电路模型,并给出了部分参数计算方法。开关间隙在约 60 ns 时间内被近似线性地充电至约 1 MV,开关的放电电流、输入和输出电压分别用罗果夫斯基线圈和硫酸铜水电阻分压器测试。进行了 2 个间隙结构和 4 个间隙结构开关实验,开关的放电电流 200~550 kA,平均击穿场强 600~900 kV/cm。开关间隙抖动小于 4 ns,开关间隙的击穿迟滞时间约为 60 ns,2 个间隙结构开关的间隙之间的击穿同步性能可以优于 3 ns,4 个间隙结构开关的间隙之间的击穿同步性能可以优于 5 ns。预脉冲被有效地压缩,输出电压的预脉冲幅值约为输入电压预脉冲幅值的 50%,从 180 kV 压缩至约 90 kV,作用时间由 600 ns 压缩至 60 ns。

关键词: 水介质; 自击穿; 多通道开关; 预脉冲

中图分类号: TN782 **文献标识码:** A

在水介质脉冲功率装置中,脉冲形成开关常常选用多通道自击穿水介质开关,它是位于脉冲形成线和传输线之间的高电压强电流高功率开关。这种开关在 PBFA-I, Z 和 ZR 等装置上得到研究和应用。PBFA-I 使用具有预脉冲屏蔽板的平板型水介质自击穿多针开关,Z 装置改为具有预脉冲屏蔽板的同轴型水介质自击穿 4 针开关,ZR 设计为同轴-平板型水介质自击穿开关。我们的实验在“闪光 II”装置^[1]上进行,开关的电极为 2 对或 4 对,开关电压 0.5~1.4 MV 电压,放电电流为 200~550 kA,电脉冲宽度约 150 ns,实验的多通道自击穿水介质开关在装置中的位置为图 1 的 S₃。在进行实验时,去掉脉冲传输线(PTL)前端的预脉冲抑制电感,并短接气体预脉冲开关 S₂。S₁ 为水介质自击穿主开关,PFL 为水介质脉冲形成线,POL 为水介质脉冲输出线,负载为 2 Ω 水电阻。

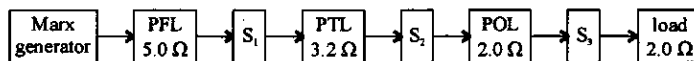


Fig. 1 Experimental position of the multi-channel self-breakdown water switch on Flash II generator

图 1 多通道自击穿水开关在“闪光 II”装置上的实验区域

1 开关结构设计及等效模型

结合“闪光 II”装置的参数,并根据放电形成多通道数目的马丁经验公式,估算得到在该装置上相应实验区域进行的水介质多通道自击穿开关的放电形成通道数目为 6~8 个,开关设计为 4 对电极开关结构,以确保形成 4 个有效放电通道,可以安装 2 对或 4 对电极。开关设计为正极性放电模式,最高运行电压 1.4 MV,最大放电电流为 550 kA,电极间隙平均电场强度由 ZR 装置设计使用的经验公式得到^[2-3]

$$f = E_{av} t_{eff}^{1/2} / 100 \quad (1)$$

式中: f 为击穿概率因子; t_{eff} 为电脉冲作用时间,μs; E_{av} 为间隙平均电场,kV/cm。 U 为自击穿电压(kV),开关间距 $d = U / E_{av}$,取 $f = 1, t_{eff} = 30 \text{ ns}, U = 1.5 \text{ MV}, d = 2.6 \text{ cm}$ 。

预脉冲屏蔽板开孔边缘的场畸变因子较开关电极引出杆的大,开关负极性充电,开关导通后,产生正极性流柱,开孔边缘与电极杆的间隙距离由下式求出^[4]

$$d_1 = 2.28 \times 10^{-5} V_{BD} t_{eff}^{0.4} \quad (2)$$

式中: V_{BD} 为开关输出电压, t_{eff} 决定于开关输出波形脉宽,所有变量使用国际单位制。

* 收稿日期:2005-09-02; 修订日期:2005-11-18

基金项目:42105 基金项目资助课题(4210509)

作者简介:夏明鹤(1974—),男,助研,从事脉冲功率技术研究工作;xiamh@mail.china.com。

开关的输入端接机器的脉冲输出线的输出端,输出端接 $2\ \Omega$ 的 CuSO_4 水电阻匹配负载。开关的 3 维结构如图 2 所示,其简化的集中参数等效电路如图 3 所示。忽略了流柱发展引起的时变参数部分, L_p, C_p, R_p 分别为不变的开关电感、间隙泄漏电容和泄漏电阻, C_{pi} 和 C_{po} 为屏蔽板对地电容。开关等效电路模型的 Pspice 模拟和开关的部分参数计算表明,预脉冲屏蔽板结构能够有效地减小开关输出的预脉冲^[5]。

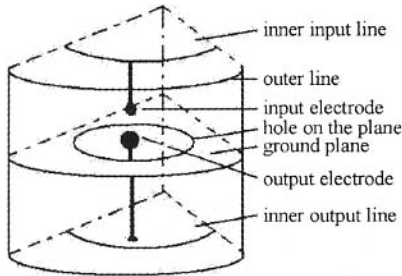


Fig. 2 One quarter of the switch configuration
图 2 开关的 3 维结构示意图

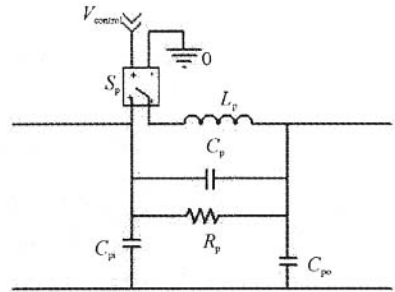
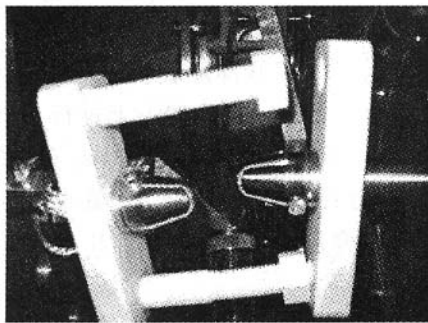
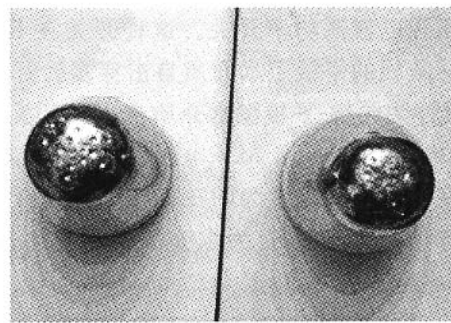


Fig. 3 Model of equivalent electric circuit
图 3 水介质开关的集中参数等效电路

开关间隙由电极头、电极引出杆和支撑尼龙结构部件构成独立结构(见图 4(a))。4 对开关电极通过电极杆分别连接在开关的输入和输出线的内筒端面上, CuSO_4 水电阻分压器的高压端连接在电极杆上测试开关的输入或输出电压。在开关的 2 个端面间安装一块有 4 个开孔的预脉冲屏蔽接地板,开关电极杆穿过开孔,与相应的电极形成间隙。通过插入预脉冲屏蔽接地板,输入输出线与地之间引入对地电容,耦合到输出线的预脉冲电压减小。为了测量每对电极形成的间隙在放电时通过的电流,在预脉冲屏蔽接地板的开孔处内置罗果夫斯基电流线圈,用于放电电流信号测试。



(a) damage of the nylon support



(b) discharge erosion of electrodes

Fig. 4 Photos of the damaged nylon support and electrode erosion

图 4 电极烧蚀与支撑结构的损坏照片

2 实验的测试方法

2 对电极结构水介质开关,对称地安装了 2 对开关电极,开关的输入、输出电压分别用水电阻分压器测试,开关的每个间隙的放电电流用 RL 线圈或微分线圈测试,由此可以得到 2 个间隙的输入输出电压和放电电流信号,包括放电电流的自积分信号和微分信号。4 对电极结构水介质开关,对称地安装了 4 对开关电极,用水电阻分压器测试开关的输出电压,开关的每个间隙的放电电流用微分线圈外加积分盒测试,可以得到 4 个间隙的输出电压和放电电流信号。电压的测试点为开关间隙两侧的电极球头(即测试间隙的输入输出电压),电流由安装在预脉冲屏蔽板上开孔位置的电流线圈测试。

由开关输入输出电压和放电电流的测试波形可以得到开关间隙抖动、间隙击穿迟滞时间、间隙之间的同步性能、自击穿电压、放电电流、有效放电通道数目和预脉冲作用时间及幅值等特性参数。

3 实验现象

在 2 间隙开关实验过程中,当一个放电间隙的放电电流大于等于 $250\ \text{kA}$ 时,用来支撑固定开关间隙电极的尼龙杆被损坏,尼龙杆和支撑尼龙板无沿面放电痕迹,如图 4(a) 所示。支撑尼龙杆损坏的主要原因是开关放电时的“电水锤”效应,也称为“液电效应”。产生液电效应必须具备的条件是有隔离间隙、大电流和较窄的电流脉宽。开关实验的电脉冲作用时间约为 $100\ \text{ns}$,电流脉宽约 $150\ \text{ns}$,放电间隙电流高达 $250\ \text{kA}$,满足产生液

电效应的条件。4 个间隙开关实验的每个间隙的电流小于 200 kA, 实验中没有出现绝缘支撑结构被放电冲击损坏现象, 原因是每个间隙的能耗较 2 间隙开关的每个间隙能耗小, 产生的冲击波的冲击压强小, 不足以对支撑结构造成破坏, 这也证实了支撑结构损坏原因的判断是正确的, 即冲击波是造成支撑结构损坏的主要原因。

国外学者的研究表明^[6], 水开关在放电过程中存在冲击波效应, 放电产生的冲击波的压强达 10^7 Pa, 并且约 80% 的辐射能量集中在径向 30° 的立体角内。可以认为在开关放电过程中, 液电效应产生的径向剪切冲击力是破坏的作用原因, 而不是轴向的冲击拉力所致。

图 4(b) 给出放电实验后开关电极表面的烧蚀状况的照片。由于开关在放电期间要损耗大量能量, 电流产生的焦耳热导致电极的金属被熔化, 放电之后在产生放电通道的地方留下直径约 2 mm、深度超过 1 mm 的放电烧蚀坑。

4 实验结果与讨论

在“闪光 II”加速器上进行了 2 个间隙结构和 4 个间隙结构的水介质自击穿开关实验研究, 使用 CuSO_4 水电阻分压器和电流线圈测试了开关放电间隙的输入输出电压和放电电流。使用 3 种不同直径和形状的电极球头, 研究了电极场畸变系数、放电流柱的极性、电极间距等因素对开关性能的影响。开关设计受到实验平台的限制, 开关输出端接假负载, 实验的开关不是脉冲输出开关。开关的运行电压为 0.5~1.4 MV, 放电电流为 200~550 kA。开关的设计指标: 最高工作电压 1.5 MV, 最大工作电流 600 kA, 开关电感小于 100 nH, 间隙抖动小于 5 ns。计算的开关电感为 45 nH, 模拟结果表明, 开关电感约 25 nH。

实验表明, 开关的 2 个或 4 个间隙都是有效放电通道, 多通道的形成减小了开关电感。在设定的运行电压作用下, 开关间隙抖动可以小于 2 ns, 间隙的击穿迟滞时间约为 60 ns, 估算的流柱速度为 40~100 cm/ μs , 间隙之间的自击穿时间差可以小于 4 ns, 提高间隙之间的击穿同步性能可以提高开关输出特性。开关的预脉冲电压被有效地压缩, 开关输出的预脉冲电压幅值约为输入的预脉冲电压的 50%, 作用时间由约 600 ns 压缩至约 60 ns。

负流柱的平均流柱速度近似满足公式^[7]

$$v_{\text{av}} = 79E_{\text{av1}}^{0.5} \quad (3)$$

式中: E_{av1} 为间隙的平均击穿电场强度, 单位 MV/cm; v_{av} 单位为 cm/ μs 。有效作用时间由下式计算

$$t_{\text{eff}} = d/v_{\text{av}} \quad (4)$$

由式(3)、式(4)推出平均电场强度

$$E_{\text{av1}} = 1.6 \times 10^{-4} d^2 / t_{\text{eff}}^2 \quad (5)$$

正流柱的间隙击穿电场强度近似于^[8]

$$E_{\text{BD}} = \frac{1.3 \times 10^5}{t_{\text{eff}}^{0.33} A^{0.08}} \quad (6)$$

式(3)~(6)中的有效作用时间 t_{eff} 取为间隙电场大于 70% 自击穿电场的作用时间。

dI/dt 信号反映开关间隙电流的变化速率, 在导通前预脉冲电压被隔离, 开关间隙的电流变化较小。当流柱产生时, 间隙之间有大量电荷移动, 在强电场作用下, 流柱被加速, 在扩展传播过程中形成多通道, 开关间隙的电感和电阻迅速减小。因此, 可以认为 dI/dt 的突变点为流柱产生时刻。 dI/dt 的突变点至输出电压起点的时间约为间隙击穿迟滞时间的 75%, 如果认为该时间为间隙的有效作用时间, 由式(3)~(6)计算的平均自击穿电场强度的值大于实验测量值, 取有效作用时间为间隙击穿迟滞时间的 30%, 即间隙场强大于 70% 击穿场强的作用时间, 则该计算与实验基本吻合。

同时, dI/dt 信号可以作为间隙是否提前导通放电的判据。图 5 给出一个间隙的输入输出电压和 dI/dt 信号, 图 5(a) 中的 dI/dt 信号上升较缓、幅值较小, 开关间隙在较低的电压时自击穿, 图 5(b) 中的 dI/dt 信号上升较快、幅值较大, 开关间隙在预计的击穿电压击穿放电。产生先导通放电的原因可能是在放电间隙较小时, 间隙中有气泡或杂质, 开关电极在上一次放电时被较严重烧蚀而引起较大的场畸变。

5 结 论

在“闪光 II”加速器上进行了 2 个和 4 个间隙结构的水介质自击穿开关实验研究, 使用 CuSO_4 水电阻分压器和电流线圈测试了开关放电间隙的输入、输出电压和放电电流。通过 1 MV 开关实验, 为设计大型脉冲功率

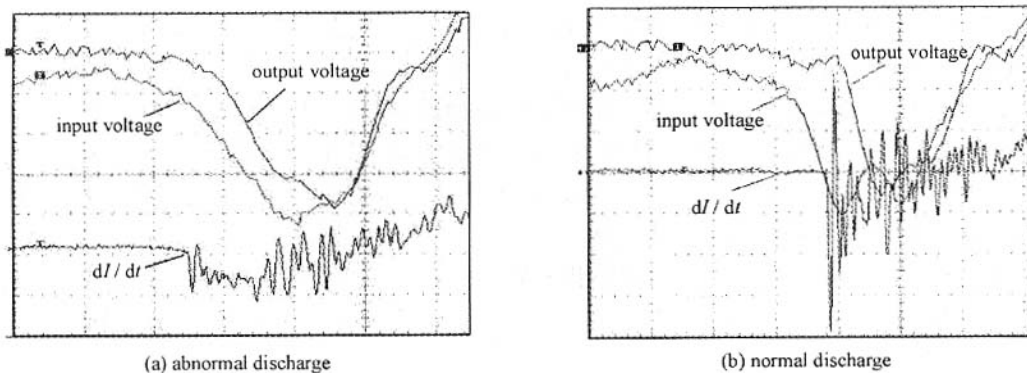
Fig. 5 Input/output voltage and dI/dt wave-shape

图 5 输入/输出电压和电流波形

装置的更高电压等级的高功率水介质自击穿开关提供实验和数据支持。需要深入研究开关特性,对开关结构进行优化设计,为多路并联打下基础。

致 谢: 衷心感谢邱爱慈院士、盖同阳老师、黄建军博士、韩文辉工程师、曹文彬研究员、王勐助研、秦卫东同志在实验中提供的帮助和建议。

参考文献:

- [1] 彭建昌, 刘国治, 张嘉生. 强流电子束二极管电路模型及其分析[C]//第八届高功率粒子束暨高压学术交流会论文集. 2001: 115. (Pen J C, Liu G Z, Zhang J S. The circuit model of high current electron beam diode and its analysis[C]//Proceedings of 8th High Power Particle Beams and High Voltage Science symposium, 2001: 115)
- [2] Struve K W, Corley J P, Johnson D L, et al. Design options for a pulsed-power upgrade of the Z accelerator [C]//13th IEEE International Pulsed Power Conference. 2002: 569.
- [3] Rosenthat S E, Pointon T D, Elizondo J M, et al. Investigating the electromagnetic behavior of the coax-to-triplate transition for the pulse-compression section of the ZR-accelerator[C]//14th IEEE International Pulsed Power Conference. 2003: 626-629.
- [4] Johnson D L, Martin T H, VanDevender J P. High power density water dielectric switching[J]. *IEEE Trans on Plasma Science*, 1980, **8** (3):204.
- [5] 夏明鹤, 谢卫平, 李洪涛, 等. 具有预脉冲屏蔽板的水介质自击穿开关的电路模拟[J]. *强激光与粒子束*, 2004, **16**(12):1621-1625. (Xia M H, Xie W P, Li H T, et al. Simulation of water pulse forming line switch with prepulse suppression ground plane. *High Power Laser and Particle Beams*. 2004, **16**(2):1621-1625).
- [6] VanDevender J P. The resistive phase of a high-voltage water spark[J]. *J Appl Phys*, 1978, **49**(5): 2616.
- [7] Wilkinson G M. Time-dependent capacitance effects in water dielectric switching[C]//4th IEEE International Pulsed Power Conference. 1983: 323.
- [8] Vandevender J P. Short pulse electrical breakdown strength of H_2O [C]//1st IEEE International Pulsed Power Conference. 1976: PIIE3-1.

Investigation of a low prepulse multi-channel self-breaking water switch

XIA Ming-he, XIE Wei-ping, LI Hong-tao, WANG Yu-juan, YANG Zi-xiang, DENG Jian-jun,
FENG Shu-ping, WEI bing, WU Shou-dong, REN Jing, MENG Wei-tao, FU Zhen
(*Institute of Fluid Physics, CAEP, P.O. Box 919-108, Mianyang 621900, China*)

Abstract: A low prepulse high power density water dielectric self-breaking switch has been investigated on Flash II generator recently. The switch contains two or four gaps, a prepulse shield and supporting hardware. The configuration and equivalent circuit model of the switch are introduced while part parameter calculations are provided in this paper. All gaps of the switch were charged approximately linearly from 0 to 1 MV in 60 ns. The discharge current and the input or output voltages of each gap were measured by a Rogowski coil and $CuSO_4$ resistance dividers respectively. The switches with two gaps and four gaps were experimented respectively. The water switch was discharged with a discharge current about 200 to 550 kA after the gaps were charged and had a mean field of 600 to 900 kV/cm. The jitter of the same gaps was smaller than 4 ns. All two gaps broke down in 3 ns while all four gaps discharged in 5 ns after the gaps were charged to breakdown voltage. The prepulse was suppressed by a prepulse shield in the switch geometry that the output prepulse was smaller than 50% that of the input. It is apparent that the prepulse action time of the gap is suppressed from 600 ns to 60 ns while the prepulse voltage is suppressed from about 180 kV to 90 kV.

Key words: Water dielectric; Self-breaking; Multi-channel switch; Prepulse