

文章编号: 1001-4322(2005)09-1414-05

脉冲电压下的自击穿水介质开关击穿特性和电路参数实验研究*

丛培天, 蒯 斌, 邱爱慈, 王亮平, 吴撼宇, 曾正中, 贾 伟

(西北核技术研究所, 陕西 西安 710024)

摘 要: 介绍了“强光一号”加速器中两种结构的自击穿水开关,建立了简化的开关电路模型,并通过估算和 Pspice 模拟确定了开关的电路参数,包括电极间杂散电容、火花通道电感和火花电阻。研究表明开关导通过程中的流注电容效应可以忽略,放电通道火花电感与电阻选取流注导通时刻的值,且在主放电电流传递过程中保持不变。根据实验结果,阐述了两种开关击穿的不同特点:对于局部电场增强型的球-板电极结构的主开关,可以采用 J. C. Martin 稍不均匀场水击穿经验公式估算临界场强;而棒-板电极结构的多针开关,适合用 J. C. Martin 针-板击穿模型的水击穿经验公式估算临界场强,且并联工作的 9 个多针开关可以同时形成独立的放电通道。

关键词: 水介质开关; 脉冲电压; 击穿特性; 电路参数; “强光一号”加速器

中图分类号: TN782; TL99 **文献标识码:** A

水开关作为能量馈送和输出的关键部件,在高功率脉冲加速器的低阻抗水介质传输线中经常被采用,如美国 Maxwell 实验室的 BLACKJACK 和俄罗斯强流电子学所的 γ -3 等^[1,2]装置,国内也开展了相关的工作^[3]。水开关性能研究包括确定开关的脉冲击穿电压,开关击穿前的杂散电容、泄露电阻,开关击穿过程中形成的弧道电感和电阻等。在“强光一号”加速器中主要包括两种自击穿水介质开关,一种是处于中储电容与脉冲形成线之间的单通道转移开关(下称“主开关”),另一种是处于脉冲形成线与脉冲输出线之间的多通道输出开关(下称“多针开关”),见图 1。本文主要介绍这两种开关击穿特性和电路参数的实验研究结果。

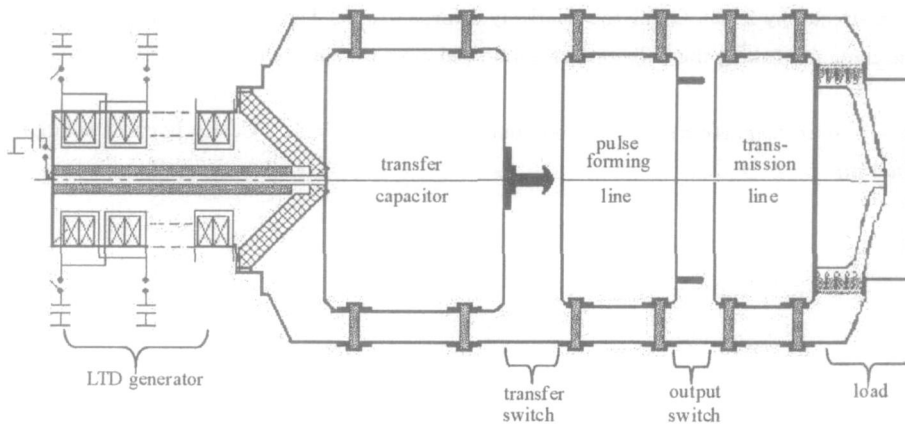


Fig. 1 Block of Qiangguang-I accelerator

图 1 “强光一号”加速器结构

1 电路模型

根据 G. M. Wilkinson, F. J. Sazama 和 P. W. Spence 等人的研究结果^[4-6],一个比较完整的反映水开关流注击穿过程的电路模型如图 2 所示。 C_w, R_w 分别是开关的杂散电容和泄露电阻,可根据开关结构和水电阻率估算; L_s 为开关引杆的自感与流注通道电感之和,其中,开关引杆的电感可以根据其几何结构计算; R_s 是流注通道电阻; C_{ws}, R_{ws} 为流注头部与开关阳极之间的杂散电容和泄露电阻。在放电的过程中, L_s, R_s, R_{ws} 以及 C_{ws} 是随流注发展而变化的。

* 收稿日期:2005-01-04; 修订日期:2005-06-01
基金项目:国家自然科学基金重点资助课题(10035020)
作者简介:丛培天(1974—),男,硕士,助研,主要从事脉冲功率技术研究;西安 69 信箱 10 分箱。

考虑到只有当放电流注几乎贯穿开关的两个电极后,开关电流才会发生显著变化^[3],计算时 L_s 和 R_s 取流注导通时的值,并且认为在主电流传导过程中保持不变。对于本文所述主开关和多针开关,通常其主放电流注的截面积远小于电极面积,因此忽略 R_{ws} 和 C_{ws} 的影响,开关的电路模型可以简化为图 3, R_w 可根据开关距离、面积和水电导率估算。

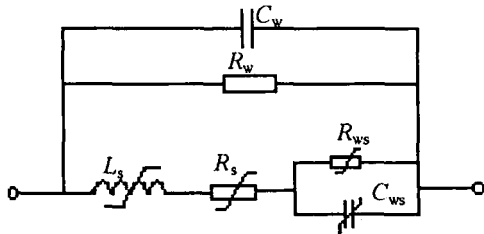


Fig. 2 A streamer model of water switch

图 2 水开关击穿的等效电路模型

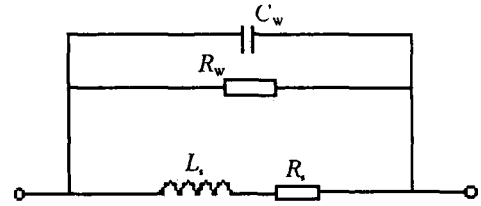


Fig. 3 A simplified streamer model of water switch

图 3 水开关击穿的简化电路模型

对于主开关,其流注通道的电感根据电弧的直径大小略有不同,通常取 $12 \sim 14 \text{ nH/cm}$,流注通道电阻为 $(35 \pm 14) \text{ m} / \text{cm}^{[1]}$ 。已知开关引杆几何尺寸和火花通道的直径,可以根据下式估算多针开关的电感^[7]

$$L_r = \frac{\mu_0}{2} \left[\ln \frac{r_0}{r} + \frac{1}{3} \frac{h}{r_i} \left(1 - \frac{1}{10} \frac{h^2}{r_i^2} + \dots \right) + \frac{1}{4m} + \frac{1}{m} \ln \frac{r}{mr_s} \right] \quad (1)$$

l_s 为开关引杆或火花通道长度; r_s 为开关(或电弧)半径,本文取电弧半径为 1 mm ; r 为开关分布圆周芯线半径; r_0 为水线外筒外径; r_i 为水线外筒内径; h 为水线外筒厚度 ($h = r_0 - r_i \ll r_i$); m 为开关数目。由于火花通道电阻只影响开关放电波形的后沿,因此多针开关的火花通道电阻可以利用 Pspice 软件并通过全电路模拟确定。表 1 给出了开关各电路参数的估算值。图 4 示出了本文采用的模拟电路及各部分参数值,除了主开关火花电感明显大于估算值以外,其余参数基本上采用了表 1 提供的数值。

表 1 开关参数的估算值

Table 1 Calculation value of switch parameters			
	C_w / nF	L_s / nH	$R_s /$
transfer switch	4.2	338	0.15
output switch	6.7	57	

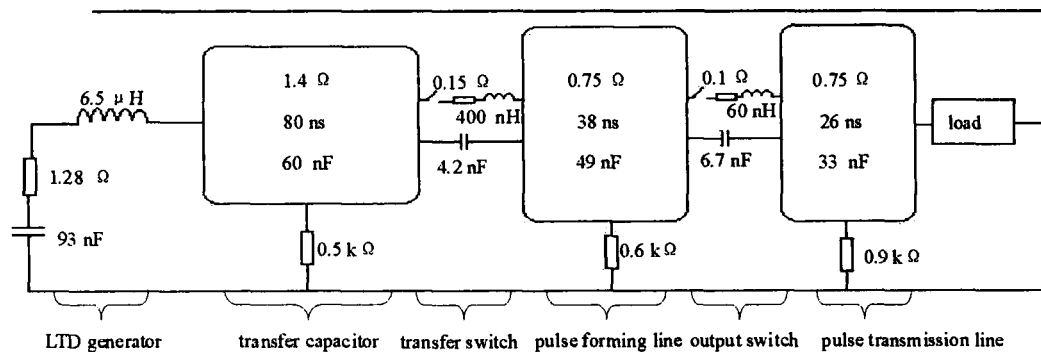


Fig. 4 Electrical model of Qianguang-I

图 4 “强光一号”的电路模型

图 5、图 6 给出了主开关与多针开关的典型实验波形(实线)及其计算结果(虚线),两者符合较好,说明图 3 开关的简化模型和参数估算是合理的。

2 开关场强分析与实验结果

首先,定义开关的工作系数为

$$g = E / E_b \quad (2)$$

式中: E 为开关实际工作场强; E_b 为开关临界击穿场强。作为理论分析而言,不妨认为当工作系数 g 大于 1, 则开关发生击穿, 否则开关不击穿。为了使开关在预期的电压下导通, 应该尽量选择开关理论工作系数 $g > 1$ 。实际应用中, 为获得最大传输能量, 如果开关击穿电压与水线的最大安全工作电压一致, 则可以选择开关工作系数 g 略大于 1, 以确保安全稳定运行。

2.1 主开关

主开关采用局部场增强的球-板间隙结构,如图 7(a)所示,它在半球形主电极顶部设计安装了小半径的半球形附加电极,是在球-板构型间隙(图 7(b))的基础上改进而成。采用球-板稍不均匀电场构型的开关,开关电

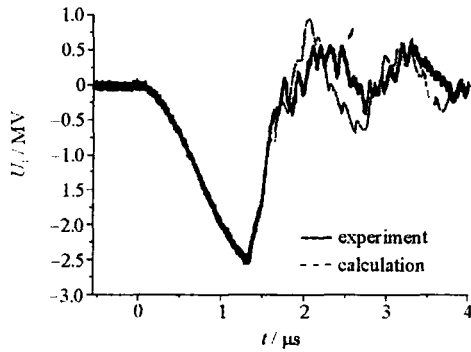


Fig. 5 Voltage of the transfer capacitor

图 5 中储电容的电压波形

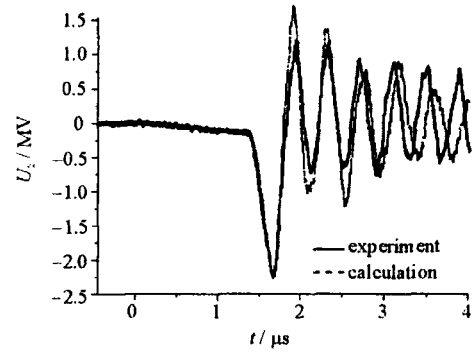


Fig. 6 Voltage of the pulse-forming line

图 6 形成线的电压波形

极表面直接受到放电电流熔蚀后会导致开关击穿分散性增大。在开关主电极顶部安装小尺寸附加电极,通过增加附加电极上的电场,既可以降低因开关放电通道位置随机变化而引起的击穿分散性,也可以避免或减少主电极融蚀。

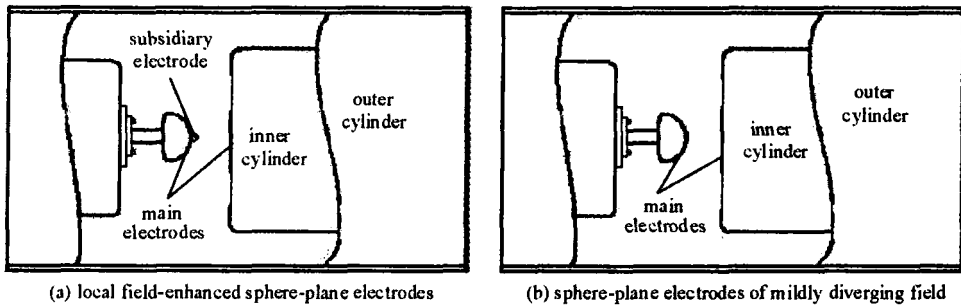


Fig. 7 Two different structures for the transfer switch

图 7 主开关的两种不同电极结构

对主开关临界场强的估算有两种方法。首先根据 J. C. Martin 经验公式,稍不均匀场电极的临界击穿场强满足如下关系^[9]

$$E_b = K_{\pm} A^{-1/10} t^{-1/3} \tag{3}$$

式中: E_b 为临界击穿场强 (MV/cm), 对于稍不均匀电场, 取开关的最大场强; 电压为正极性时取 $K_+ = 0.3$, 负极性时取 $K_- = 0.6$; A 为电极有效面积 (cm^2); t 为电压有效作用时间 (μs), 即从电压峰值的 63% 开始到击穿点的时间, 由电压波形可以确定间隙的临界击穿场强。

如图 7(a), 对于局部场增强型球-板结构的开关, 附加电极面积远小于整个主电极的面积, 而且其突出部分远小于开关间距, 与图 7(b) 中的球-板间隙相比, 在相同间距和电压下开关平均场强基本不变。采用 (3) 式估算开关临界击穿场强时, 电极有效面积可根据图 7(b) 所示结构并通过数值模拟得到, 模拟的电场分布见图 8(b)。计算开关实际工作场强的最大值仍以图 7(a) 为准, 模拟的电场分布见图 8(a)。

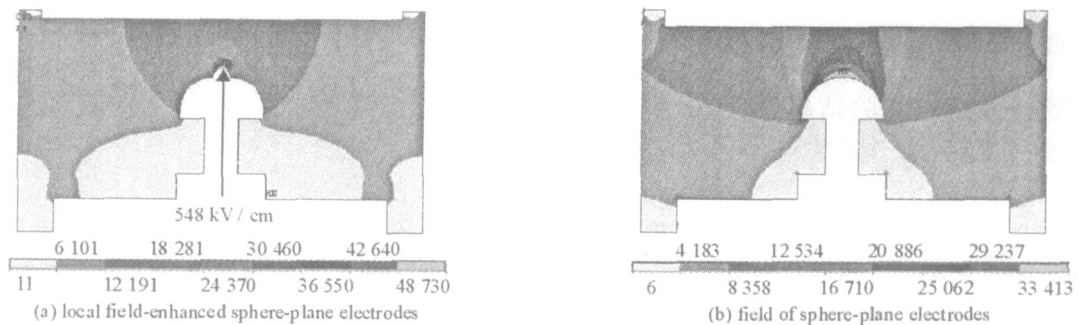


Fig. 8 Analysis of electrostatic field in transfer switch (the gap length is 9cm)

图 8 主开关电场模拟(针-板间距:9 cm)

其次, 按照尖-板电极水击穿的经验公式^[9], 开关临界击穿场强(临界平均场强)为

$$E_b = Kt^{-1/3}, K = 0.16 \tag{4}$$

根据“强光一号”直线型脉冲变压器对中储电容的充电波形(图 5),开关最大实际工作电压约为 2.5 MV,平均有效作用时间约为 0.45 μs,由(3)式计算开关临界击穿场强为 532 kV/cm。当电极间距为 9 cm 时,根据数值计算结果,图 7(a)所示主开关附加电极处最大场强为 548 kV/cm(见图 8(a)),此时工作系数 $g = 1.03$ 。按照公式(4),临界平均场强约为 209 kV/cm。根据表 2 的实验结果,开关的实验平均场强为 276 kV/cm,工作系数 g 约为 1.32。表 2 是采用新电极的主开关在 2.5 MV 电压下连续 13 次实验的统计结果,这说明对于主电极顶端有小半球形附加电极的主开关,采用第一种方法估算临界场强是比较合适的。

另外,对于使用超过 100 次后附加电极发生熔蚀的旧开关,主开关击穿电压会明显降低,分散性也相应增大。表 3 是旧开关实验结果,开关实验平均工作场强为 242 ~ 255 kV/cm,根据(4)式,工作系数 g 为 1.16 ~ 1.22。这是由于电极表面熔蚀后造成开关局部电场进一步增强所致。

表 2 新电极主开关击穿电压的实验统计结果

Table 2 Experimental data of the transfer switch with new electrodes

gap length / mm	breakdown voltage		
	mean value/ MV	standard deviation/ MV	relative standard deviation/ %
90	2.48	0.12	4.8

表 3 旧电极主开关击穿电压的实验统计结果

Table 3 Experimental breakdown voltage of the transfer switch with old electrodes

gap length/ mm	90	88	82 ~ 85	80
mean value/ MV	2.18	2.15	2.08	1.95
standard deviation/ MV	0.21	0.12	0.11	0.09
relative standard deviation/ %	9.6	5.6	5.3	4.6

2.2 多针开关

“强光一号”多针开关采用 9 个棒-板间隙并联工作的方式,它们在圆周上均匀分布,结构见图 9。在每只棒状球头形电极表面具有与主开关类似的附加电极,开关的电场分布属于极不均匀场。根据下式可以判断多针开关能否形成多通道放电^[10]

$$0.1 t_{tot} + 0.8 T_n > 2 r_v \frac{V_{max}}{(dV/dt)_{max}}, \quad t_{tot} = \frac{V_{max}}{(dV/dt)_{max}} \quad (5)$$

式中: T_n 为电磁波在相邻通道的传播时间,也称隔离时间; r_v 是脉冲电压的相对标准偏差; V_{max} 与 $(dV/dt)_{max}$ 分别为脉冲电压及其上升率的最大值。

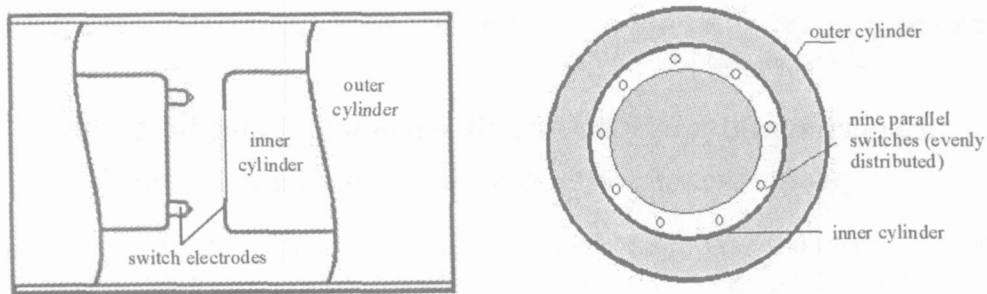


Fig. 9 Structure of the output switch

图 9 多针开关结构示意图

“强光一号”形成线电压的有效作用时间约为 0.13 μs,利用公式(4)计算多针开关临界击穿场强约为 316 kV/cm。由表 4 列出的 13 次实验统计结果,(实验条件:水电阻率 1 ~ 2 M · cm;环境温度 16 ~ 28),估算多针开关的工作系数 g 为 1.03,说明多针开关击穿电压适合用针-板模型估算。

根据多针开关的实验电压波形和电极位置分布,得出 $t_{tot} = 220$ ns, $T_n = 18$ ns。由表 4 知 $r_v = 2.43$ %,代入(5)式得到

$$0.1 t_{tot} + 0.8 T_n = 36 \text{ ns} > 2 r_v t_{tot} = 11 \text{ ns}$$

因此,“强光一号”多针开关有可能形成 9 个并联的放电通道。

表 4 多针开关击穿电压的实验统计结果

Table 4 Experimental data of output switch

gap length / mm	breakdown voltage		
	mean value/ MV	standard deviation/ MV	relative standard deviation/ %
72	2.21	0.05	2.43

4 结 论

电极间杂散电容、火花通道电感和火花电阻是水开关最重要的电路参数,而开关导通过程中的流注电容效应可以忽略,放电通道火花电感与电阻取流注导通时刻的值,且在主放电电流传递过程中保持不变。Pspice 的模拟计算结果与实验结果基本一致,说明开关模型及有关参数估算方法是合理的。实验表明,主开关近似满足稍不均匀场的击穿规律;多针开关符合针-板击穿模型,且能够同时形成 9 个并联放电通道。

参考文献:

- [1] Miller A R. Sub-ohm coaxial pulse generators, BLACKJACK 3, 4 and 5[A]. Proc of 3rd IEEE International Pulsed Power Conference[C]. Albuquerque, New Mexico, 1981. 200—205.
- [2] [J]. , 1995, (12): 76—80. -3
- [3] 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(12): 1621—1625)
- [4] Wilkinson G M. Time-dependence effects in water dielectric switching[A]. Proc of 4th IEEE International Pulsed Power Conference[C]. Albuquerque, New Mexico, 1983. 323—326.
- [5] Sazama F J, Kenyon V L. A streamer model for high voltage water switches[A]. Proc of 2nd IEEE International Pulsed Power Conference [C]. Lubbock, TX, 1979. 187—190.
- [6] Spence P W, Chen Y G, Frazier G, et al. Inductance and resistance characteristics of single-site untriggered water switch in water transfer capacitor circuits[A]. Proc of 2nd IEEE International Pulsed Power Conference[C]. Lubbock, TX, 1979. 359—362.
- [7] 丛培天, 蒯斌, 邱爱慈, 等. “强光一号”预脉冲气体开关特性研究[J]. 强激光与粒子束, 2003, 15(7): 725—728. (Cong P T, Kuai B, Qiu A C, et al. Research of prepulse gas switch for Qiangguang-I generator. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, 15(7): 725—728)
- [8] Martin T H, Guenther A H, Kristiansen M. J. C. Martin on pulsed power[M]. New York: Plenum Press, 1996.
- [9] 王亮平, 邱爱慈, 蒯斌, 等. “强光一号”加速器 Z 箍缩丝阵负载的零维模拟[J]. 强激光与粒子束, 2004, 16(2): 261—264. (Wang L P, Qiu A C, Kuai B, et al. Zero dimensional simulation method for wire array Z-pinch on Qiangguang-I generator. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, 16(2): 261—264)
- [10] 曾正中. 实用脉冲功率技术引论[M]. 西安:陕西科学技术出版社, 2003. 65—69. (Zeng Z Z. An introduction to applied high power pulse technology. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 2003. 65—69)

Experimental study on circuit parameters and breakdown properties of water switch under pulsed voltage

CONG Pei-tian, KUAI Bin, QIU Ai-ci, WANG Liang-ping, WU Han-yu, ZENG Zheng-zhong, JIA Wei
(Northwest Institute of Nuclear Technology, P. O. Box 69-10, Xi'an 710024, China)

Abstract: Two kinds of self-breakdown water switches with different configurations for Qiangguang-I accelerator were described. The electrical model of the water switch was built. By estimation and Pspice calculation, the parameters of the switches were determined. The acquired breakdown characteristics of the two different switches by experiments were described by two different breakdown models. The critical field of the transfer switch could be calculated by J. C. Martin empirical expression about water breakdown with a mostly uniform field. The critical field of the output switch could be calculated by J. C. Martin expression about divergent field of point-plane electrodes. The experimental data of breakdown of water switch show that the above-mentioned methods for breakdown field calculation are reliable.

Key words: Water switch; Pulsed voltage; Breakdown property; Circuit parameter; Qiangguang-I accelerator