

文章编号: 1001-4322(2008)08-1402-03

强光一号 2.4 MV 环-板型水介质开关光学诊断*

盛 亮, 张国伟, 丛培天, 袁 媛, 王培伟, 赵吉祯, 彭博栋, 孙铁平, 王亮平, 魏福利

(西北核技术研究所, 西安 710024)

摘 要: 利用 ns 级时间分辨可见光分幅相机和光纤传感器对“强光一号”环-板型水介质开关进行光学测量, 得到了电流通道发展图像以及整个放电过程的光强变化信号。实验结果表明, 环-板型水介质开关开始击穿时的平均场强约为 190 kV/cm, 同时存在多个放电通道, 流注呈树枝状分布, 发展速度为几十 cm/ μ s。

关键词: 水开关; 光学诊断; 分幅相机; 光纤传感器; 发展速度

中图分类号: TL782; O536 **文献标志码:** A

水开关应用于脉冲功率装置已有二十多年的历史, 是能量输入和馈送的关键部件^[1]。“强光一号”加速器是目前国内输出功率最大的一台组合式多用途高功率强流脉冲电子束加速器^[2], 其主开关为环-板型水介质自击穿开关, 峰值电压约为 2.4 MV, 国内水开关性能研究大多基于电磁测量^[3-5], 文献[6]采用条纹相机和分幅相机来研究水开关光放电通道流注的运动与发展。本文建立了一套包括可见光分幅相机和光纤传感器的光学测量系统, 研究放电通道流注的形状与发展速度, 并对开关放电过程发光强度进行监测, 与电磁测量系统一起来诊断水开关的性能。

1 光学诊断系统概述

“强光一号”环形阴极外径 8 cm, 内径 6 cm, 距离阳极板约 10.5 cm, 观察窗口采用有机玻璃。光学诊断系统由可见光分幅相机和光纤传感器组成, 如图 1 所示。其中, 物镜焦距 300 mm, 放大倍数约为 1:9, M_1, M_2, M_3 为半透半反镜, 将水开关的放电通道像方光路分成 4 路, 分别输入到 ICCD(intensified charge-coupled device) 相机像增强器阴极面和光纤输入端面。利用“强光一号”给出的主开关电流信号触发相机同步机, 然后通过同步机输出的同步信号来对具有不同时间延迟的电子快门进行触发, 控制 3 路 ICCD 的开启时间, 实现 ns 级时间同步^[7], 获得不同时刻的放电流注图像。

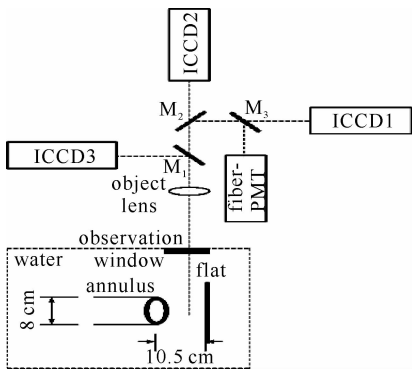


Fig. 1 Setup of optical diagnostics

图 1 光学诊断系统安排

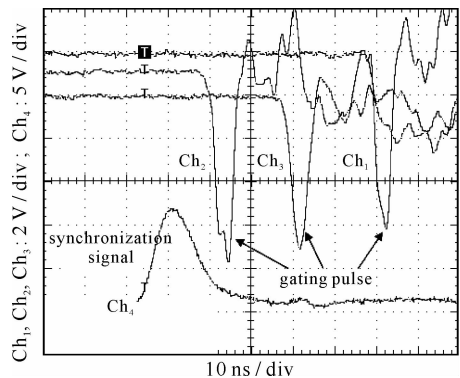


Fig. 2 Waveforms of gating pulse and synchronization signal of shot 08103

图 2 08103 发电快门脉冲和同步信号波形

可见光分幅相机的时间分辨率主要由电子快门的半宽度决定^[8]。图 2 为 08103 发电快门和同步信号监测波形, 从图中可以看出, 可见光分幅相机的时间分辨约为 5 ns。空间分辨主要由 ICCD 模块^[8]中的像增强器和 CCD 的分辨率决定, 同时考虑到系统的放大倍数, 对目标的空间分辨率约为 0.9 mm, 而放电通道尺度约为 10 cm, 对相机空间分辨的要求一般为其尺度的 1% 左右, 因此相机能够满足图像诊断空间分辨的要求。

* 收稿日期: 2008-04-14; 修订日期: 2008-07-09

基金项目: 西北核技术研究所基金资助课题(11030703)

作者简介: 盛 亮(1979—), 男, 博士, 助研, 主要从事脉冲辐射场测量技术研究; shengliang@tsinghua.org.cn.

光纤传感器由 62.5/125 μm 多模光纤、9815B 型光电倍增管(PMT)和示波器构成,9815B 型光电倍增管在 420 nm 时的量子效率约为 0.3,它的一些主要性能如表 1 所示。

表 1 9815B 光电倍增管参数

Table 1 Parameters of 9815B photomultiplier tube

| quantum efficiency at 420 nm | electron gain | pulsed linear current/mA | dark current /nA | rising time /ns | delay time /ns |
|---------------------------------|-----------------|-----------------------------|---------------------|--------------------|-------------------|
| 0.3 | 7×10^6 | 150 | 0.3 | 2 | 50 |

2 实验结果与讨论

图 3 为 08103 发电压波形和光纤传感器测得的放电通道发光强度波形,其中两条曲线均已经扣除了由探测器系统引起的电、光信号走时差别,电压波形采用距离开关约 1.2 m 的电容分压器测得。由图 3 可知,电压起始时刻到峰值(2.4 MV)之间的时间间隔为 1.2 μs ;开关关闭过程,即放电通道流注发展过程是快变过程,约为 250 ns,在此过程内还存在从电压起始时刻 1 000~1 060 ns 共约 60 ns 的发光强度基本不变的过程。由图 3 可以判断击穿时刻发生在电压起始时刻约 950 ns 附近,此时的平均场强约为 190 kV/cm,水开关的工作系数(开关实际工作场强与临界击穿场强之比)约为 1.2,环状阴极在经过多次放电之后,其端面被烧蚀形成带有小尖刺的粗糙表面,按照尖-板电极击穿经验公式^[9],开关临界平均场强为

$$E_b = Kt^{-1/3}, \quad K = 0.16 \quad (1)$$

式中: t 为电压有效作用时间,即从电压峰值的 63% 开始到击穿点的时间。根据图 3 中的电压波形,平均有效作用时间约为 0.45 μs ,由式(1)计算的临界平均场强约为 209 kV/cm,与图 3 的结果基本一致。

图 4 为可见光分幅相机获得的 08103 发图像序列。3 幅图像之间的时间间隔分别为 19,21 ns,从电压起始时刻 1 025 到 1 065 ns,根据图像中流注在不同时刻距离阳极板的平均距离可以估算流注的发展速度^[6],在此过程中放电通道流注发展速度基本恒定,中间和左侧流注发展速度约为 47 $\text{cm}/\mu\text{s}$,而右侧流注发展速度较快,约为 60 $\text{cm}/\mu\text{s}$,图 4(c)中放电流注的树枝状发展横向尺寸约为 17 cm,是环状阴极外径的 2 倍多。

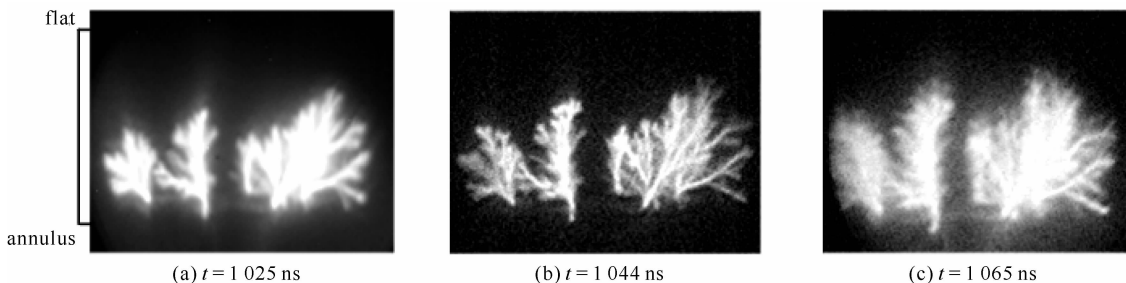


Fig. 4 Image series of shot 08103 acquired by optical framing camera

图 4 可见光分幅相机获得的 08103 发图像序列

图 5 为可见光分幅相机获得的 08108 发图像序列。其中(a)获得的时刻在击穿时刻后约 35 ns,(b)与(a)流注(最右侧)的平均发展速度为 53 $\text{cm}/\mu\text{s}$;从(b)到(c)流注(最右侧)的平均发展速度为 64 $\text{cm}/\mu\text{s}$;最右侧流注距离阳极板的距离约为 0.9 cm,最左侧流注距离阳极板距离约为 3.8 cm,而中间位置的小流注距离阳极板的距离为 6 cm,这说明这些放电通道流注“树枝状”发展并不同步,有的明显领先,有的滞后。如果领先发展的流注先到达阳极板,那么开关就会闭合,此时电流将主要从此流注上流过,从而会抑制滞后流注的进一步发展^[6]。图 5(c)中放电通道流注的横向扩展范围较广,达到 20 cm。

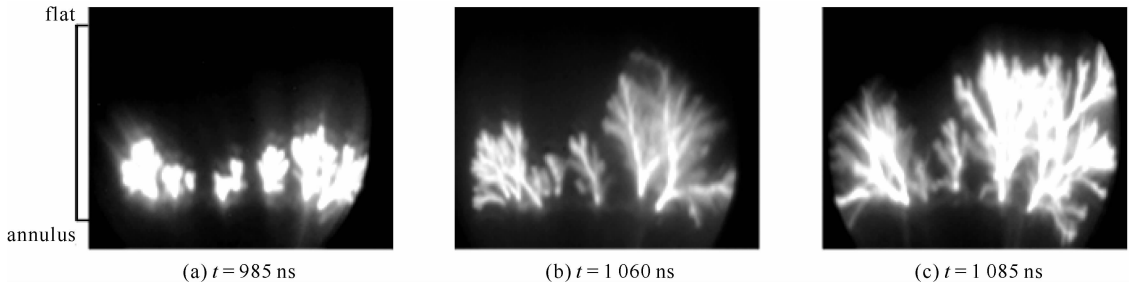


Fig. 5 Image series of shot 08108 acquired by optical framing camera

图 5 可见光分幅相机获得的 08108 发图像序列

从图 4 和图 5 中可以看出,环-板型水开关能够同时形成多个放电通道,每个通道都呈“树枝状”非线性发展,流注的这种非线性发展会改变开关电极之间的电容和电阻,从而对加速器的性能产生影响^[6]。不同炮之间放电通道的形成发展过程不相同,这可能与每次放电都会对电极表面产生一定的烧蚀、形成粗糙度不同的放电表面有关;此外水压不同也会导致开关击穿电压不同^[5],从而影响放电通道的形成与发展。

3 结 论

本文为“强光一号”水开关建立了一套包括可见光分幅相机和光纤传感器的光学诊断系统,测量结果表明,“强光一号”环-板型水开关击穿时平均场强约为 190 kV/cm,能够形成多个放电通道,这些放电通道流注呈“树枝状”非线性发展,其发展速度为几十 cm/ μ s。

致 谢 本工作得到雷天时、黄涛、吴撼宇、郭宁、韩娟娟等同志的帮助,在此表示衷心的感谢!

参 考 文 献:

- [1] Johnson D L, Vandevender J P, Martin T H. High power density water dielectric switching[J]. *IEEE Trans Plasma Sci*, 1980, **8**(3):204.
- [2] 蒯斌,邱爱慈,王亮平,等. 提高“强光一号”驱动 Z 箍缩负载电流的研究[J]. 科学技术与工程, 2006, **6**(8):1671-1815. (Kuai B, Qiu A C, Wang L P, et al. Research on increasing current of Qiangguang-I for driving Z pinch load. *Science Technology and Engineering*, 2006, **6**(8):1671-1815)
- [3] 丛培天,蒯斌,邱爱慈,等. 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[J]. 强激光与粒子束, 2005, **17**(9):1414-1418. (Cong P T, Kuai B, Qiu A C, et al. Experiment study on circuit parameters and breakdown properties of water switch under pulsed voltage. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17**(9):1414-1418)
- [4] 夏明鹤,谢卫平,李洪涛,等. 多通道自击穿水开关测试方法研究[J]. 强激光与粒子束, 2005, **17**(11):1744-1748. (Xia M H, Xie W P, Li H T, et al. Test methods of multi-channel water self-breaking switch. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17**(11):1744-1748)
- [5] 贾伟,邱爱慈,孙凤举,等. 百纳秒脉冲下水压对水开关击穿特性的影响[J]. 高电压技术, 2006, **32**(1):50-53. (Jia W, Qiu A C, Sun F J, et al. Effects on the pressure under the several hundred nanosecond pulse on the breakdown characteristics of the water switch. *High Voltage Engineering*, 2006, **32**(1):50-53)
- [6] Woodworth J R, Lehr J M, Elizondo-Decanini J, et al. Optical and pressure diagnostics of 4-MV water switches in the Z-20 test facility[J]. *IEEE Trans Plasma Science*, 2004, **32**(5):1778-1789.
- [7] 盛亮. 可见光分幅相机研制及丝阵负载 Z 箍缩图像诊断[D]. 北京:清华大学, 2007. (Sheng L. Development of optical-framing camera and imaging diagnostics for wire array Z-pinch. Beijing: Tsinghua University, 2007)
- [8] 盛亮,魏福利,吕敏,等. 丝阵负载 Z 箍缩可见光图像诊断系统[J]. 强激光与粒子束, 2006, **18**(8):1936-1940. (Sheng L, Wei F L, Lü M, et al. Optical image diagnostics system for wire array Z-pinch. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, **18**(8):1936-1940)
- [9] Martin T H, Williams M, Kristiansen M. J. C. Martin on pulsed power[M]. New York: Plenum Press, 1996.

Optical diagnostics of 2.4 MV annulus-flat water switch in Qiangguang-I facility

SHENG Liang, ZHANG Guo-wei, CONG Pei-tian, YUAN Yuan, WANG Pei-wei, ZHAO Ji-zhen, PENG Bo-dong, SUN Tie-ping, WANG Liang-ping, WEI Fu-li
(Northwest Institute of Nuclear Technology, P. O. Box 69-9, Xi'an 710024, China)

Abstract: The optical diagnostics of annulus-flat water switch in “Qiangguang-I” facility was carried out utilizing optical framing camera and fiber sensor. The images of the discharging channels and the irradiance intensity signal during charging stage were acquired. The experiment results showed that the average breakdown electric field of annulus-flat water switch was about 190 kV/cm, several discharging channels were observed at the same time, the streamers appeared like bush and their velocity was about tens of cm/ μ s.

Key words: Water switch; Optical diagnostics; Framing camera; Fiber sensor; Evolution velocity