

用于 FLTD 的陶瓷封装多间隙气体开关*

姜晓峰^{1,2}, 丛培天¹, 周文渊¹, 王志国^{1,2}, 降宏瑜¹, 孙铁平¹

(1. 西北核技术研究院 强脉冲辐射模拟与效应国家重点实验室, 西安 710024; 2. 西安交通大学 电力设备电气绝缘国家重点实验室, 西安 710049)

摘 要: 为了提高多间隙气体开关壳体的寿命、绝缘可靠性和装配的一致性, 基于堆栈式多间隙气体开关开展了陶瓷封装多间隙气体开关工艺及击穿特性的研究。对比分析了不同封接工艺对陶瓷金属界面场分布的影响, 优选了合理的封接结构。研制了用于 FLTD 的陶瓷封装多间隙气体开关并对其自击穿特性和触发特性开展了测试, 结果表明: 开关充干燥空气气压 0.3 MPa、耐压 ± 100 kV、峰值电流约 30 kA 条件下, 5 000 次放电的触发平均时延 36.4 ns, 抖动 2.8 ns。该结果展示了陶瓷封装气体开关在产品化和免维护方面的优势, 在 FLTD 模块中具有广阔应用前景。

关键词: 多间隙; 气体开关; 陶瓷封装; 直线变压器驱动源; 沿面绝缘

中图分类号: TM89

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202032.190383

Ceramic packaged multi-gap gas switch for fast linear transformer driver

Jiang Xiaofeng^{1,2}, Cong Peitian¹, Zhou Wenyuan¹, Wang Zhiguo^{1,2}, Jiang Hongyu¹, Sun Tieping¹

(1. State Key Laboratory of Intense Pulsed Radiation Simulation and Effect, Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China;

2. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To improve the housing lifetime, insulation reliability and assembly consistency, the process and breakdown characteristics of a ceramic packaged multi-gap gas switch used for fast linear transformer driver (FLTD) were studied based on the multi-gap gas switch with stackable insulators and electrodes. The effects of different sealing processes on the electric field distribution of the interface between ceramic and metal were compared and analyzed, then the reasonable sealing structure was optimized. A ceramic packaged multi-gap gas switch was designed and its self-breakdown and triggering characteristics were experimentally tested. The results show that when the switch operates at the charging voltage of ± 100 kV, the gas pressure of about 0.3 MPa and the peak current of 30 kA, the average delay time of 5 000 shots is 36.4 ns and the jitter is 2.8 ns. The ceramic package gas switch has the advantages on productization and maintenance-free, and will have broad application prospects in FLTD module.

Key words: multi-gap; gas switch; ceramic packaging; fast linear transformer driver; surface insulation

快前沿直线型变压器驱动源 (FLTD) 是国际上正在发展的一种新型脉冲功率源技术, 在 Z 箍缩、高能密度物理、辐射环境模拟等领域有广阔的应用前景^[1-5]。FLTD 型脉冲功率源往往要求数万只乃至数十万只放电开关同步工作。开关的性能将直接影响 FLTD 输出电流的前沿和幅值, 同时对整个系统的稳定性和可靠性也有较大影响。用于 FLTD 的放电开关成为制约直线脉冲变压器驱动源发展的关键性技术难题之一。

目前 FLTD 广泛采用一种多间隙串联的气体放电开关^[6-7]。该开关由俄罗斯大电流研究所 (HCEI) 提出并应用于首个 1 MA/100 kV FLTD 模块^[6], 随后扩展到多级串联 FLTD 模块。开关性能基本满足使用要求, 但在降低开关电感、提高可靠性等方面仍需优化。国内外对多间隙气体开关的绝缘结构、触发结构、触发方式等也开展了大量研究^[8-12]。西北核技术研究所研制了一种堆栈式的多间隙气体开关^[10], 采用金属电极与有机玻璃绝缘子相互交叠堆栈的结构。开关触发性能优异, 开关工作电压 ± 100 kV, 峰值电流约 32 kA, 工作气压 0.3 MPa 下, 触发击穿时延约 51 ns, 50 000 次放电抖动约为 4.5 ns。开关壳体采用有机玻璃材料, 电极与壳体依靠金属螺钉连接。

长期测试结果表明, 在洁净的情况下有机玻璃的表面绝缘能力较强, 但是在受到放电产物污染的情况下, 有机玻璃绝缘子表面绝缘能力显著下降, 限制了开关的工作寿命。另外有机玻璃材料受环境温度影响较大, 热胀冷缩

* 收稿日期: 2019-09-25; 修订日期: 2020-01-15

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51790521, 51790523)

作者简介: 姜晓峰 (1985—), 男, 硕士, 助理研究员, 从事高功率气体开关和直线变压器驱动源技术研究; jiangxiaofeng@nint.ac.cn。

效应明显,不利于保证开关的安装精度。在开关数量较大时,开关的一致性很难保证,这中间既有机械加工的问题,也有组装过程的问题,需要耗费大量人力物力进行筛选。因此有必要对绝缘子材料和开关制备方式进行改进,延长开关放电寿命,提高开关一致性。氧化铝陶瓷具有硬度高,强度大,绝缘性能好、气密性好,热冲击性能优异,与许多金属材料的可焊性好等优点,广泛应用于电力系统绝缘器件中。

本文在现有堆栈式多间隙气体开关基础上,壳体采用氧化铝陶瓷材料以提高开关绝缘和抗污染能力,设计研制了用于 FLTD 的陶瓷封装多间隙气体开关,搭建了实验平台,对开关的静态特性和触发特性开展了研究。

1 陶瓷封装气体开关设计

陶瓷封装多间隙气体开关由堆栈式电极支撑结构和外腔体组成。堆栈式电极支撑结构如图 1 所示。环形放电电极侧壁开有环形槽,支撑片呈 45°扇形。每个环形电极均匀插入三只支撑片,叠放在圆环形的绝缘垫块上。环形电极、支撑片和绝缘垫块三者嵌套在一起构成一层绝缘堆栈。5 层绝缘堆栈、顶部和底部高压电极构成独立的开关电极支撑结构,由此形成 6 个串联的放电间隙,每个间隙距离为 5 mm。绝缘垫块的外侧开有气孔,以利于绝缘气体交换。绝缘堆栈中部预留有触发引入孔和充放气孔。开关电极支撑结构在装配完毕后,可整体放入外腔体中,通过弹簧压片以保证顶部和底部电极与外电极的电气接触良好。

开关外腔体由 95% 氧化铝陶瓷壳体和外电极构成。陶瓷壳体直径 157 mm,高度 141 mm。采用等静压成型并高温烧结而成。外电极材料为不锈钢。由于氧化铝陶瓷很难进行打孔加工,必须通过金属化之后与不锈钢金属钎焊进行封装。而陶瓷与金属的热物理性能不匹配,使得陶瓷金属连接接头在焊后往往产生巨大的残余热应力,致使接头强度降低。因此确保封装结构的可靠性和绝缘特性满足使用要求是陶瓷封装多间隙气体开关的设计关键。

常用的金属与陶瓷钎焊封装结构有三种,分别为立封、平封和套封。立封是指可伐金属环立于陶瓷金属化端面上,焊料置于可伐金属环根部的两端,如图 2(a)所示。焊接后在陶瓷焊接面会形成薄的金属连接层,而对于开关来讲,该金属层将与开关的高压电极相连接,在边界处会形成较强的电晕放电,不利于开关的外绝缘,因此本文不采用立封方式。套封是指将可伐环套在陶瓷侧壁的金属化电极外侧,可伐环与陶瓷壁之间放置焊料,如图 2(b)所示。为了避免高压电极出现尖棱,将可伐截面制作成 U 型。平封是指薄的可伐与陶瓷端面压平,可伐上端压有小块的补偿瓷以降低钎焊过程中可伐金属的变形量,如图 2(c)所示。

结合堆栈式开关具体结构,本文采用金属与陶瓷平封结构。陶瓷材料与金属紧密贴合,而且陶瓷将金属电极

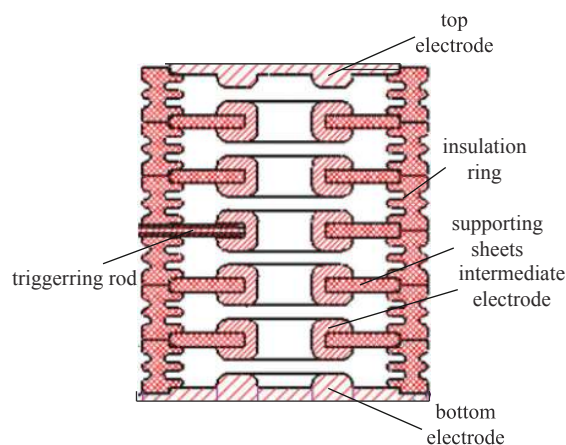


Fig. 1 Schematic diagram of electrode support structure

图 1 堆栈式电极支撑结构示意图

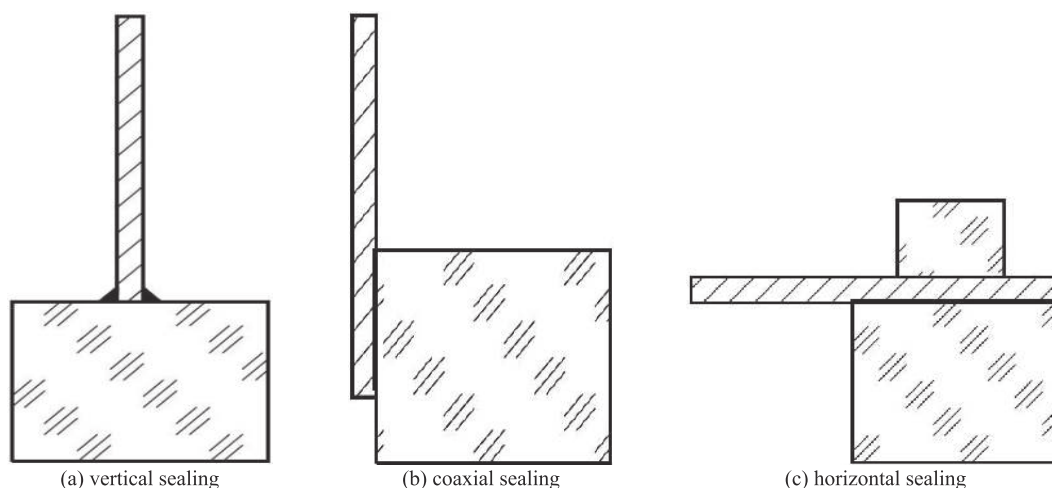


Fig. 2 Metal and ceramic packaging structures

图 2 金属与陶瓷钎焊封装结构

包裹,一方面使陶瓷、金属和油的三结合点处的场强明显降低,另一方面增加了开关的外沿面距离。装配完成后的开关照片如图 3 所示。开关高压电极外配有屏蔽环,整个开关直径 160 mm,高度 181 mm。从底部到顶部陶瓷壳体外部沿面距离大于 110 mm,内部沿面距离大于 85 mm。利用有限元软件对开关静态电场分布进行了模拟。图 4 给出了开关耐压 ± 100 kV 时的电场分布图。开关各个间隙电场分布均匀,且电场强度高的地方均集中在放电区。此时单个间隙峰值场强为 75 kV/cm,间隙电场不均匀系数为 1.13。

图 5 给出了沿陶瓷壳体的外表面和内表面电场分布情况。该开关沿陶瓷内、外表面平均电场强度约为 15 kV/cm,峰值电场强度均小于 35 kV/cm。由此保证陶瓷壳体表面不发生沿面放电。

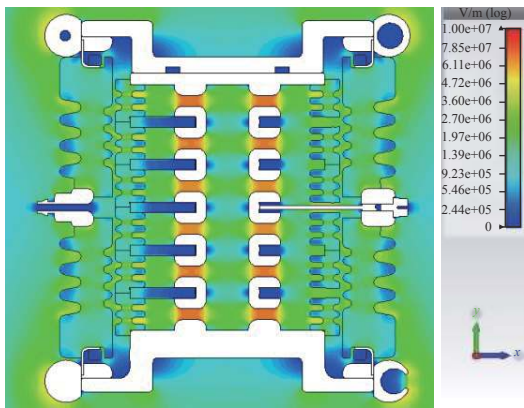


Fig. 4 Electric field distribution of the switch

图 4 开关电场分布图



Fig. 3 Ceramic packaged multi-gap gas switch

图 3 陶瓷封装的多间隙开关照片

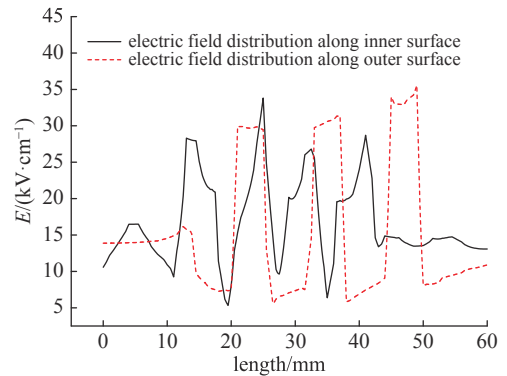
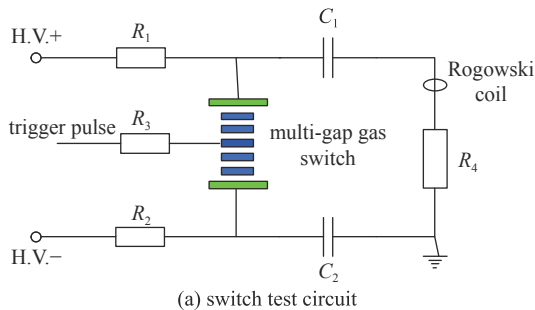


Fig. 5 Electric field distribution along inner and outer surface

图 5 沿陶瓷壳体的外表面和内表面电场分布

2 陶瓷封装多间隙气体开关实验平台

开关测试实验电路和实验平台照片如图 6 所示。 C_1 和 C_2 为储能电容器, 40 nF; R_1 和 R_2 为充电电阻, 2 M Ω ; 为了降低开关放电时的冲击对触发系统的影响设置触发隔离电阻 R_3 , 约 300 Ω ; R_4 为主放电回路负载电阻, 采用 CuSO_2 水溶液电阻, 阻值约为 2 Ω , 目的是为了控制开关放电电流及其反峰, 保护储能电容器。开关放电电流采用标准 Rogowski 电流探测器测量。为了增加绝缘部件的绝缘能力, 开关和电容器均浸泡在绝缘油中。



(a) switch test circuit



(b) switch test platform

Fig. 6 Switch test circuit and test platform

图 6 开关测试实验电路和实验平台照片

在开关测试前,由于电极表面会残留一些油污和金属碎屑,微观表面也存在一些不规则的毛刺和凸起,导致开关自击穿电压不稳定,因此必须对电极进行老炼处理,以提高自击穿电压的稳定性,同时考验开关绝缘情况。

老炼完毕后分别测试开关自击穿特性和触发特性。自击穿特性测试方法为:在一定气压下,匀速缓慢升压直到开关放电,重复放电 50 次,由此获得开关在该气压下的自击穿电压平均值及标准偏差。由此可以确定开关在实际使用条件下的工作参数。触发特性测试方法为:在一定气压和升压速度下,升压到预定电压,触发系统输出触发

脉冲,开关在触发脉冲作用下击穿放电,数据采集系统记录并存储触发脉冲和放电电流波形,获得开关触发时延数据。图7为开关触发放电的典型波形。红色为触发脉冲波形,黑色为开关放电电流波形。本文中定义触发脉冲到达开关时刻到放电电流波形的起始时刻为开关的触发击穿时延。重复50次实验,获得的触发击穿时延标准偏差即为该条件下开关击穿时延的抖动。

3 实验结果与分析

3.1 开关自击穿特性

陶瓷封装开关通过500炮老炼后,耐受电压 ± 100 kV持续60 s,开关无自放电和沿面放电现象,表明开关沿面绝缘强度满足 ± 100 kV的FLTD应用要求。

图8给出了开关的自击穿电压曲线。当开关充气0.1 MPa时,开关自击穿电压为171 kV。自击穿分散性为3.77 kV,占平均自击穿电压的2.2%。通过线性拟合得到陶瓷封装气体开关静态特性曲线的关系式为

$$U_{bd} = 60.98p + 112 \quad (1)$$

式中: p 为表压,单位0.1 MPa; U_{bd} 为气压为 p 时的计算的自击穿电压,单位kV。

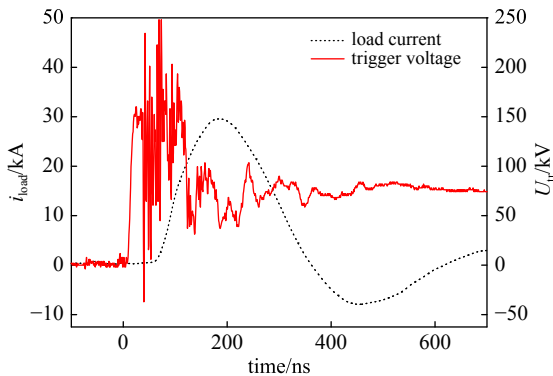


Fig. 7 Typical waveform of load current and triggering pulse

图7 开关触发放电典型波形

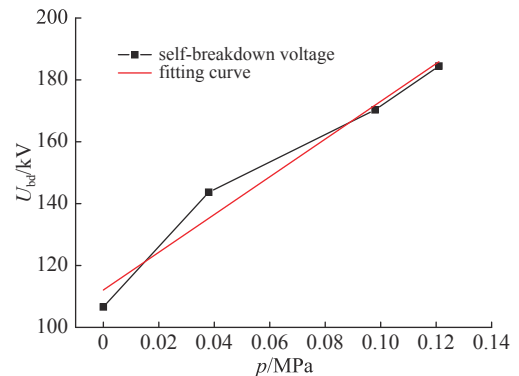


Fig. 8 Self-breakdown characteristics of the switch

图8 开关自击穿特性

3.2 开关触发特性

表1给出了触发脉冲电压幅值140 kV,触发脉冲前沿约14 ns下开关耐压从 ± 70 kV到 ± 100 kV,不同工作系数对开关触发时延及其抖动的影响。 ± 70 kV, ± 80 kV充电电压下开关工作系数低至60%仍然能获得小于2 ns的抖动; ± 90 kV, ± 100 kV充电电压下开关工作系数大于70%时开关击穿时延抖动也小于2 ns。在工作电压 ± 100 kV,工作系数70%(气压0.285 MPa)下开关触发时延33.7 ns,抖动1.41 ns。可见该陶瓷封装的多间隙气体开关具有较好的触发特性。

表1 开关在不同工作电压和不同工作系数下触发时延及其抖动

Table 1 Measured delay and jitter of the switch under various charging voltage and switching coefficient

charging voltage/kV	delay@60%/ns	jitter@60%/ns	delay@70%/ns	jitter@70%/ns	delay@80%/ns	jitter@80%/ns
± 70	47.9	1.4	38.7	1.6	33.8	0.6
± 80	46.6	1.5	36.5	1.5	32.4	1.2
± 90	46.1	3.2	34.3	1.3	31.4	1.2
± 100	44.1	4.5	33.7	1.4	31.0	3.0

为了考核开关可靠性,在工作电压 ± 100 kV、峰值电流约30 kA条件下,气压0.3 MPa下开展了5 000次寿命实验。图9给出了5 000次放电实验中开关击穿时延随放电次数的变化情况。统计得到5 000次放电开关的触发平均时延36.4 ns,抖动2.8 ns,实验过程中未发现开关自击穿放电情况。与原堆栈式多间隙气体开关50 000次实验结果(时延51 ns,抖动4.5 ns)对比可知,该陶瓷封装多间隙气体开关具有相对更小的触发时延和抖动。主要原因是此次考核所用触发脉冲幅值比原堆栈开关的高约20 kV。

图10给出了开关每间隔1 000炮,连续50发实验统计的平均时延和抖动的变化。6次统计的击穿时延分别为37.0, 36.2, 36.5, 38.6, 36.2, 36.7 ns,整个考核试验过程中,开关触发时延较为稳定。

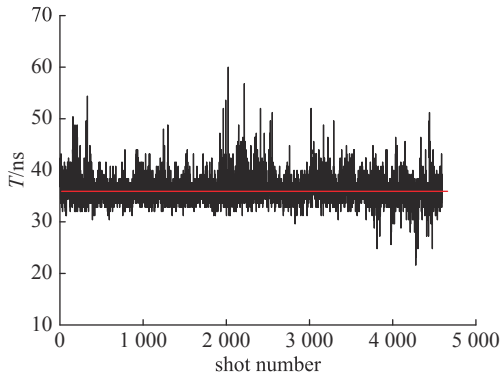


Fig. 9 Change of trigger delay of 5 000 discharges

图9 5 000次放电开关触发时延的变化

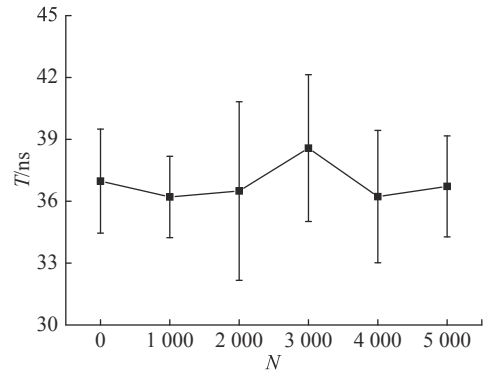


Fig. 10 Average time delay and jitter of 50 consecutive discharges after every 1 000 discharges

图10 每间隔1 000炮开关连续50发的平均时延及其抖动

4 结 论

本文对陶瓷封装多间隙气体开关的封装工艺进行了研究,通过对开关静态电场的分析获得了性能稳定的封装结构。 ± 100 kV工作条件下开关单间隙峰值电场约75 kV/cm,间隙电场不均匀系数为1.13,同时开关壳体沿面平均电场强度约为15 kV/cm,峰值电场强度均小于35 kV/cm,开关沿面绝缘强度满足FLTD应用要求。实验结果表明开关具有优良的静态特性和触发特性。开关气压0.3 MPa、耐压 ± 100 kV、峰值电流30 kA条件下,5 000次放电的触发平均时延36.4 ns,抖动2.8 ns。目前为了拆卸方便,外电极与开关陶瓷壳体采取法兰连接,针对未来用于FLTD模块中的气体开关,可以采取钎焊方式将开关外电极与陶瓷直接封装,由此可减少开关的密封环节同时降低开关高度。

致 谢 感谢陕西宝光陶瓷科技有限公司赵童刚工程师和尚晓博工程师在陶瓷封接方面给予的指导和帮助。

参考文献:

- [1] 邓建军, 王勳, 谢卫平, 等. 面向Z箍缩驱动聚变能源需求的超功率重复频率驱动器技术[J]. *强激光与粒子束*, 2014, 26: 100201. (Deng Jianjun, Wang Meng, Xie Weiping, et al. Super-power repetitive Z-pinch driver for fusion-fission reactor[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2014, 26: 100201)
- [2] 孙凤举, 邱爱慈, 魏浩, 等. 闪光灯相快放电直线型变压器脉冲源新进展[J]. *现代应用物理*, 2015, 6(4): 233-243. (Sun Fengju, Qiu Aici, Wei Hao, et al. Development of fast linear transformer drivers for radiography[J]. *Modern Applied Physics*, 2015, 6(4): 233-243)
- [3] Zhou Lin, Li Zhenghong, Wang Zhen, et al. Design of a 5-MA 100-ns linear-transformer-driver accelerator for wire array Z-pinch experiments[J]. *Phys Rev Accel Beams*, 2016, 19: 030401.
- [4] Stygar W A, Awe T J, Bailey J E, et al. Conceptual designs of two petawatt-class pulsed-power accelerators for high-energy-density-physics experiments[J]. *Phys Rev ST Accel Beams*, 2015, 18: 110401.
- [5] 陈林, 王勳, 邹文康, 等. 中物院快脉冲直线型变压器驱动源技术研究进展[J]. *高电压技术*, 2015, 41(6): 1798-1806. (Chen Lin, Wang Meng, Zou Wenkang, et al. Recent advances in fast linear transformer driver in CAEP[J]. *High Voltage Engineering*, 2015, 41(6): 1798-1806)
- [6] Kim A A, Mazarakis M G, Sinebryukhov V A, et al. Development and tests of fast 1-MA linear transformer driver stages[J]. *Phys Rev ST Accel Beams*, 2009, 12: 050402.
- [7] Kim A, Frolov S, Alexeenko V, et al. Prefire probability of the switch type fast LTD[C]//17th IEEE International Pulsed Power Conference. 2009: 565-570.
- [8] Cong Peitian, Sun Tieping, Zeng Zhengzhong, et al. Analysis and enhancing of self-breakdown voltages of a multi-stage gas switch[J]. *IEEE Trans Plasma Sci*, 2013, 41(1): 187-191.
- [9] 丛培天, 邱爱慈. 快脉冲直线变压器气体开关技术[J]. *强激光与粒子束*, 2012, 24(6): 1263-1268. (Cong Peitian, Qiu Aici. Review on gas switches developed for fast linear transformer driver[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2012, 24(6): 1263-1268)
- [10] 孙铁平, 丛培天, 曾正中, 等. 快前沿直线脉冲变压器驱动源多间隙气体开关[J]. *强激光与粒子束*, 2010, 22(7): 3039-3042. (Sun Tieping, Cong Peitian, Zeng Zhengzhong. Multi-gap switch for fast linear transformer driver[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, 22(7): 3039-3042)
- [11] 姜晓峰, 丛培天, 孙凤举, 等. 电晕均压多间隙串联气体开关特性实验[J]. *强激光与粒子束*, 2016, 28: 075009. (Jiang Xiaofeng, Cong Peitian, Sun Fengju, et al. Breakdown characteristics of a multi-gaps gas switch with needle-corona discharge for voltage balance[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2016, 28: 075009)
- [12] 梁川, 周林, 孙凤举, 等. 0.1Hz800kA驱动源模块研制[J]. *强激光与粒子束*, 2016, 28: 015005. (Liang Chuan, Zhou Lin, Sun Fengju, et al. Investigation of a 0.1 Hz 800 kA LTD stage[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2016, 28: 015005)