



·脉冲功率技术·

较高场畸变系数的大电流三电极气体开关*

税荣杰, 陈学秒, 王桂吉, 吴刚, 胥超, 罗斌强

(中国工程物理研究院 流体物理研究所, 四川 绵阳 621999)

摘要: 气体开关作为脉冲功率装置的关键部件, 其自击穿概率以及触发放电延时抖动对整个脉冲功率系统具有至关重要的影响。降低开关工作系数有利于提高开关稳定性, 但延时抖动会随之增大。针对用于磁驱动实验的 10 MA 级大电流装置应用需求, 设计了一种具有较高场畸变系数、能在较低工作系数条件下稳定工作的三电极气体开关, 并开展了该开关的性能研究。模拟与实验结果表明: 在触发电压与充电电压相当的条件, 开关的场畸变系数接近 4, 开关工作系数高于 60% 时, 开关具有较低的延时抖动, 抖动均方根小于 3 ns。结合该开关设计了一个两级 Marx 储能模块, 充电电压 ± 50 kV 条件下短路放电, 模块回路放电电流峰值达到 150 kA、周期 2 μ s。上千次放电实验后, 开关电极表面未发生明显烧蚀, 工作正常。工作系数 68.5% 时, 共计 4 000 发实验中未出现自放电现象, 自击穿概率低于 2.5×10^{-4} 。上述结果表明该开关可满足 300~400 只开关同时工作的大电流装置需求。

关键词: 脉冲功率; 气体开关; 抖动; 场畸变系数

中图分类号: TM836

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202335.220349

High-current three-electrode gas switch with high field distortion coefficient

Shui Rongjie, Chen Xuemiao, Wang Guiji, Wu Gang, Xu Chao, Luo Binqiang

(Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang 621999, China)

Abstract: As a key component of pulse power device, the self-breakdown probability of gas switch and the jitter of trigger discharge delay have a crucial impact on the whole pulse power system. Reducing the working coefficient of the switch is beneficial to improve the stability of the switch, but the delay jitter will increase accordingly. Aiming at the application requirements of 10 MA level high-current devices used in magnetically driven experiments, a three-electrode gas switch with high field distortion coefficient and stable operation under low operating coefficient was designed and its performance was studied. The simulated and experimental results show that when the trigger voltage is equal to the charging voltage, the field distortion coefficient is close to 4, and when the switch operating coefficient is higher than 60%, the switch has low delay jitter with the root mean square of less than 3 ns. Combined with the proposed switch, a two-stage Marx energy storage module was designed. When discharged under the condition of charging voltage ± 50 kV and short circuit, its peak discharge current can reach 150 kA with a period of 2 μ s. After thousands of discharge experiments, no obvious ablation occurred on the surface of the switch electrodes, and it worked normally. When the working coefficient was 68.5%, there were no self-discharge phenomena in a total of 4 000 rounds, and the self-breakdown probability is lower than 2.5×10^{-4} . The above results show that the switch can meet the needs of high current devices with 300-400 simultaneously working switches.

Key words: pulse power, gas switch, jitter, field distortion coefficient

脉冲功率科学与技术可在可控聚变科学、加速器物理、材料动力学、武器物理等学科和工程领域具有广泛的应用^[1-2]。基于脉冲功率技术的磁驱动准等熵加载是近十几年发展起来的一种用于材料动力学行为研究的新型实验技术^[3-4], 其原理是利用脉冲大电流与自身感应磁场产生的随时间光滑上升的磁压力实现对样品的准等熵加载。基于全电路阻抗匹配传输是近几年来发展起来的用于磁驱动实验装置研制的新技术^[5-8], 该技术采用多个 Marx 模块

* 收稿日期: 2022-12-20; 修订日期: 2023-03-20

基金项目: 国家自然科学基金项目 (92166201, 11872347)

联系方式: 税荣杰, shuirongjie@126.com。

通信作者: 陈学秒, 15228347519@163.com。

并联储能,每个模块通过与之阻抗匹配的电缆^[5]或水同轴线^[8]等传输线汇流后直接驱动负载。这种多模块储能、阻抗匹配传输、无需脉冲压缩和直接驱动负载的技术可以有效提高能量利用效率。对于研制 10 MA 左右的用于磁驱动准等熵加载的脉冲大电流装置,预期需要 150~200 个 250 nF/200 kV 的储能模块;若储能模块采用两级 Marx 结构来降低充电电压,则共需要 300~400 个工作电压在 ± 50 kV 的气体开关。

开关性能对整个脉冲功率系统具有至关重要的影响,要保证装置的稳定运行,必须要求开关具有极低的自击穿概率。若要保证 300~400 个开关同时运行时整机具备 95% 以上的可靠性,则要求开关自放电概率达到 10^{-4} 量级。与此同时,开关的触发特性以及同步性又极大程度的影响装置的输出参数,因此要求开关具有极低的延时抖动。文献 [9-10] 实验数据显示,一般气体开关自放电概率在 10^{-3} 量级左右,不能很好满足这类装置需求,因此需要进一步优化开关设计来实现大电流承受能力、低抖动和低自击穿概率等技术指标。目前研究表明,开关自击穿概率很大程度上受开关工作系数(开关工作电压与自击穿平均电压之比)的影响,降低开关工作系数可以有效降低开关自击穿概率,但是开关触发延时抖动也会随之增大^[11-12]。针对上述需求和问题,本文开展了一种具有较高畸变系数三电极气体开关的设计及实验研究,实现在较低工作系数条件下具有较好触发特性的能力,以满足承受大电流、低抖动和低自击穿概率等技术指标需求。

1 开关设计

常见的用于正负双极性充电的开关主要有间隙气体开关^[13-15]以及三电极气体开关^[16-18],其中三电极开关相对结构简单,容易安装,有利于保证开关批量加工装配的一致性。三电极气体开关由正高压电极、负高压电极以及触发电极三个电极组成,当触发电压到达触发极时,触发极上电势突变导致电极间的电场畸变,从而使开关正负高压两个电极过压导通。设计的触发极采用圆盘结构,中间开孔使火花通过,触发边缘设计为椭圆状结构,提高场畸变系数,电场畸变强度越高,越能产生初始电子,从而使得开关更加容易导通,降低延时抖动。触发前后间隙之间最大电场强度之比称为场畸变系数,场畸变系数是影响开关击穿延时、抖动的重要参数之一。常见的三电极开关场畸变系数与触发前后触发间隙之间的电势差变化倍数几乎相当^[17-18],可以通过提高触发电压、增加触发间隙的电势差来提高场畸变系数。为了达到更好的触发性能,本文设计了一种高畸变系数结构的三电极气体开关,如图 1 所示。开关由两个圆柱形高压电极和一个中心开孔的圆盘状触发电极,高压电极材料采用 304 不锈钢,触发电极材料采用铜钨合金(钨含量 80%),两个正负高压电极的间距为 18 mm,高压电极与触发极之间的最小距离约 8.3 mm。触发电极开孔端面设计为椭圆状,以实现高的场畸变系数。

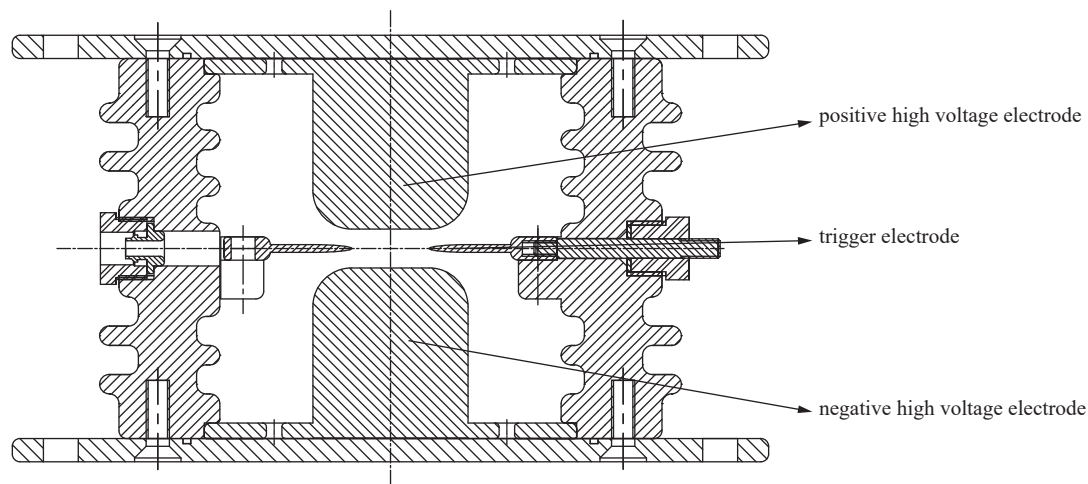


Fig. 1 Construction of switch

图 1 开关结构

2 开关电场分布模拟分析

基于 Ansoft Maxwell 软件对开关模拟电极间的电场强度分布进行了模拟。由于触发极处于正负高压电极中心对称位置,触发极上曲率半径最小处附近的电场强度较低,使得开关电极间没有尖锐电场的产生,电场强度分布均匀。在充电 ± 50 kV 条件下电极间最大电场强度为 71.4 kV/cm,场畸变系数约为 1.19,模拟结果如图 2(a)所示。在外加触发电压条件下,触发极电势不再处于中心位置,触发极上最大电场强度向椭圆开孔曲率半径最小处转移,曲

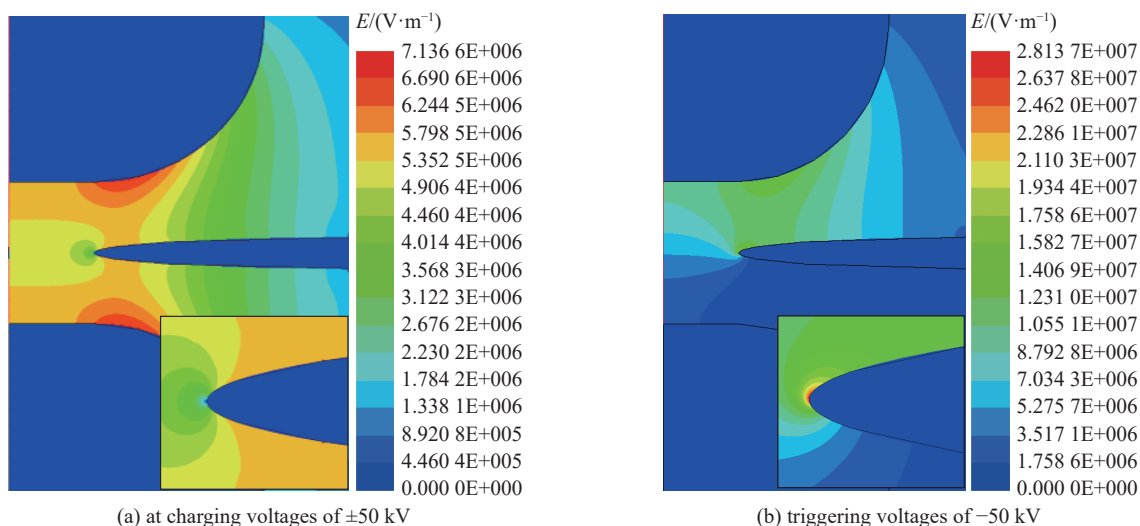


Fig. 2 Electrical field intensity distributions both between the electrodes and near the trigger pole (elliptical end face)

图2 电极间电场强度分布与触发极(椭圆端面)附近电场强度分布

率半径越小,周围电场强度越大。在外加触发电压 -50 kV 条件下,触发间隙电势差由 50 kV 变为 100 kV ,此时最大电场强度突变为 281 kV/cm ,场畸变系数为 3.92 ,模拟结果如图2(b)所示。当采用倒圆角端面触发电极时,同样触发条件下的场畸变系数约为 2.17 ,与电势差的变化倍数(2倍)相当,模拟结果如图3所示。综上所述,采用这种椭圆状端面电极,电势差突变(2倍)的同时,由于电场强度最大位置转移到电极上曲面半径最小处,使得场畸变系数达到接近4倍。

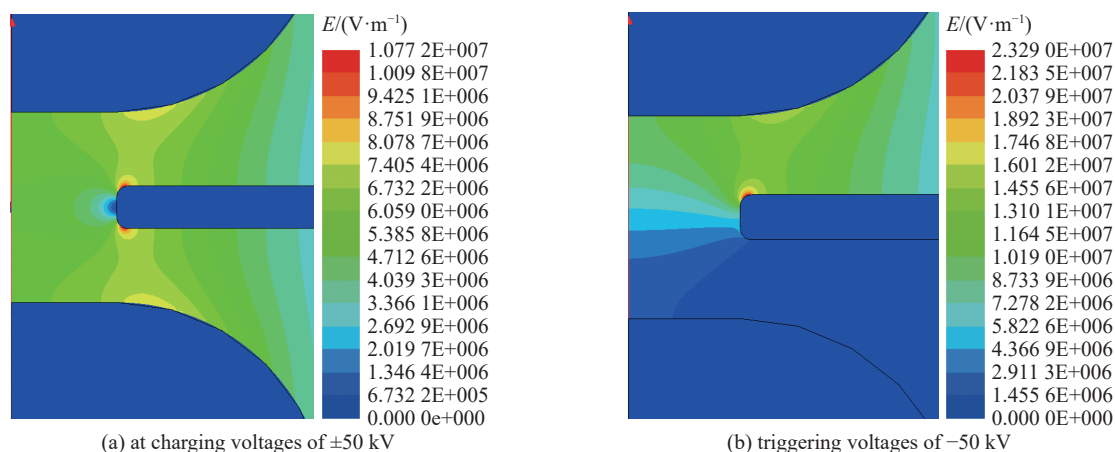


Fig. 3 Electrical field intensity distributions both between the electrodes and near the trigger electrode (fillet end face)

图3 电极间电场强度分布与触发极(倒圆角端面)附近电场强度分布

图2模拟结果表明:触发前曲率半径最小处附近电场强度最小,触发时曲率半径最小处附近电场强度最大,说明越小的曲率半径能实现越大的场畸变系数。然而受机械加工精度的影响,每个开关正负电极与触发极最小间距并不绝对相等,正负极充电电压上升速率也难以绝对相同,因此触发极并不处于电势绝对中心位置,此时触发极上过小的曲率半径反而会导致充电过程中尖锐电场的产生,影响开关稳定性。通过对正负高压电极施加不同的电压来模拟这种情况,其中正高压极充电电压 50 kV ,负高压极充电电压 -48 kV 。如图4(a)所示,当触发极最小曲率半径为 0.005 mm 时,触发极顶端出现明显的电场畸变点,最大电场强度为 97 kV/cm ,这会严重影响开关充电稳定性。考虑电极的实际加工难度,本文开关触发极设计为长半轴 30 mm 、短半轴 2 mm 的椭圆面,最小曲率半径 0.133 mm ,这种结构在正负电极电压偏差 10% 条件下,电场分布依旧较为均匀,模拟结果如图4(b)所示,最大电场强度与图2(a)结果基本一致。

3 开关性能参数测试

3.1 开关性能参数测试实验平台

开关性能参数测试实验平台包含主放电回路和触发放电回路,如图5所示。其中主放电回路由两只 80 nF

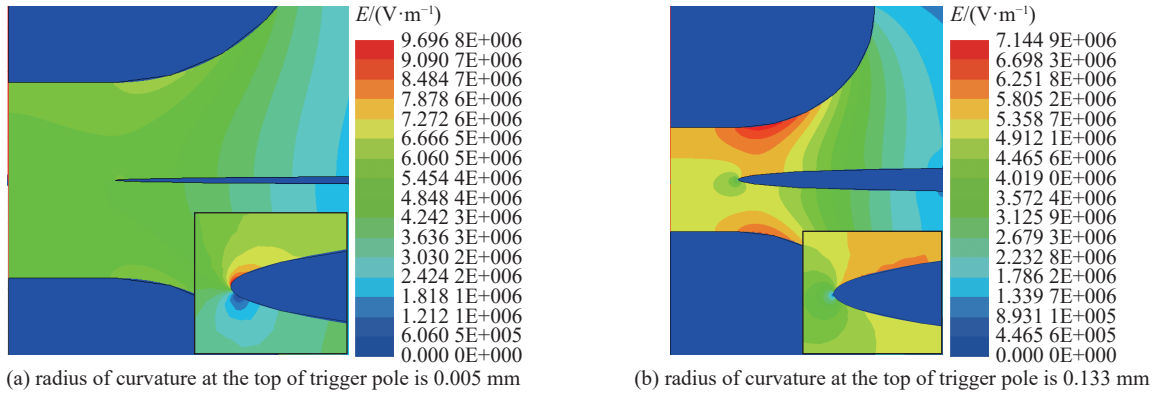


Fig. 4 Distribution of electrical field intensity when the electrical potential of positive and negative high voltage poles is not uniform

图 4 正负高压极电势不均匀时电场强度分布

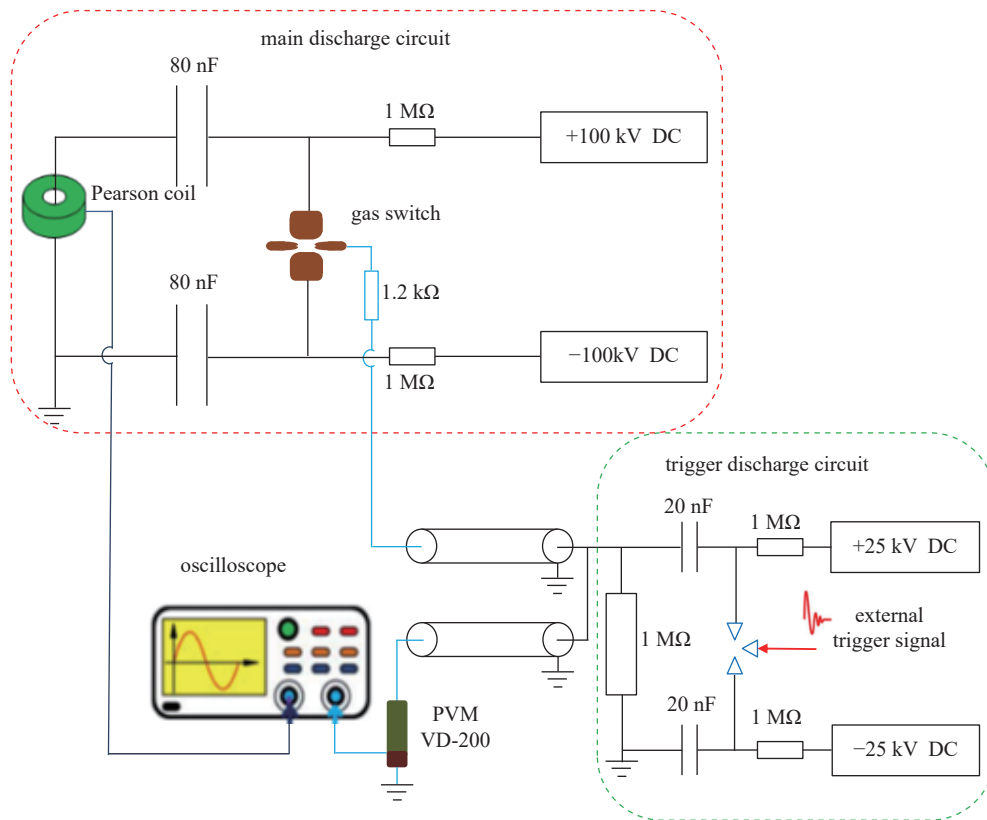


Fig. 5 Testing platform for switch performance parameters

图 5 开关性能参数测试平台

100 kV 的电容器和一只场畸变气体开关串联组成, 通过直流高压电源在开关两端施加正负高电压, 放电电流通过 Pearson 标准线圈进行检测。触发器回路也是相似的 Marx 结构, 触发器通过两根高压同轴电缆输出两路高压脉冲信号, 一路通过触发隔离电阻后触发主放电回路的场畸变气体开关放电, 另一路连接北极星高压探头 VD-200 型号 (Max DC 200 kV/Pulseed V 300 kV), 通过示波器检测电压波形。

开关放电实验包含自击穿放电实验和触发放电实验。自击穿放电实验通过直流高压电源缓慢提升开关两端电压, 直至开关击穿, 记录击穿电压值; 触发放电实验在一定工作系数条件下向开关两端施加正负高电压, 通过触发器触发放电, 由示波器记录高压脉冲信号和放电电流信号以测试触发导通延时时间。

3.2 开关性能测试结果及分析

3.2.1 自击穿实验

开关自击穿实验如图 5 主放电回路所示, 从 0.1 MPa 开始每隔 0.02 MPa(0 级干燥空气)开展 50 次自击穿实验, 记录击穿电压值。图 6 为每个气压下的自击穿电压平均值与充气气压的关系, 开关自击穿电压随气压上升基本成

线性关系,可近似用公式 $U=21.44p+4.34$ 拟合,其中 U 为自击穿电压(单位 kV), p 为气压值(单位 0.1 MPa)。

在充气气压 0.32 MPa 条件下开展了 400 余次自击穿实验,实验结果如图 7(a)所示。开关自击穿电压分布服从正态分布或者威布尔分布^[19-20],自击穿电压平均值约 73 kV,均方根约 1 kV,表明开关具有稳定的自击穿电压值。图 7(b)条状为自击穿电压分布图,其分布呈右偏锋状态,较为符合威布尔分布特征,采用两参数威布尔分布^[21]模拟如图 7(b)曲线所示,其中形状参数和比例参数分别为 109 和 73。由此可以估算出在工作系数 90% 的条件下,自击穿概率可以达到 1×10^{-5} ,不过图 7(b)中实验结果与拟合曲线表明,在自击穿电压较高区域,拟合数据与实验结果较为一致,在自击穿电压较低区域则有一定偏差,自击穿电压低于 70 kV(约平均值的 96%)的次数明显高于拟合数据,因此有必要通过大量的实验考核来检验开关的运行可靠性。

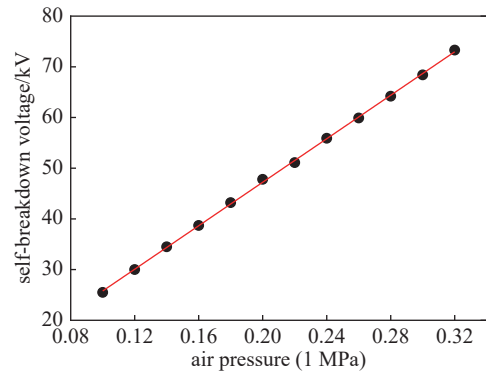


Fig. 6 Relationship between the self-breakdown voltage of the switch and the pneumatic pressure of switch

图 6 开关自击穿电压与充气气压的关系

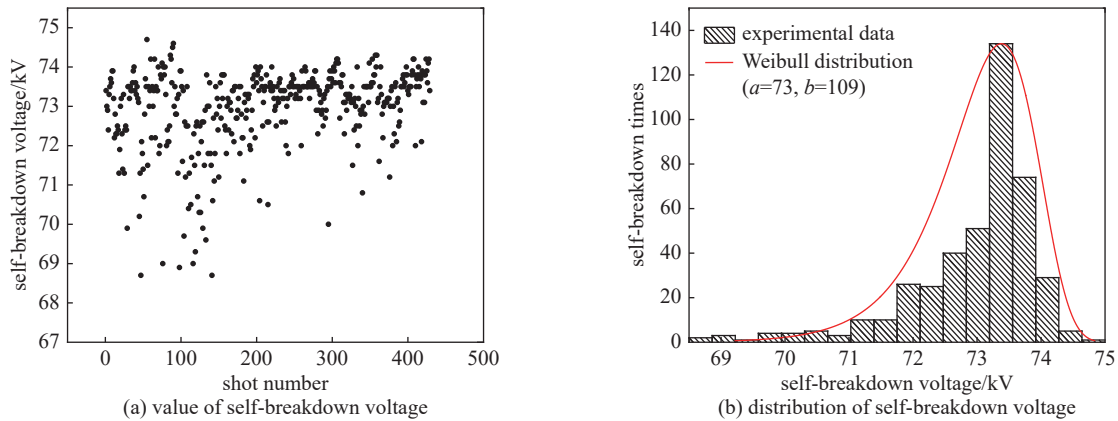


Fig. 7 Experimental results of self-breakdown at 0.32 MPa

图 7 0.32 MPa 条件下自击穿实验结果

3.2.2 触发放电实验

基于图 5 所示的实验平台开展了开关触发放电实验,触发器充电电压 ± 25 kV,选用 1.2 k Ω 的触发隔离电阻,较大的隔离电阻能更好的保护触发电路。开关充气 0.32 MPa 条件下,开展了不同充电电压下触发放电延时测量(北极星高压探头的触发信号和主放电回路的放电电流信号之间的延时信号),每个电压值进行 20 次实验,统计延时平均值与均方差,实验结果如表 1 所示。实验结果表明,该开关具有良好的触发性能,在较低的触发电压和较大的隔离电阻条件下,开关在工作系数 40% 的条件下依旧可以稳定触发,但延时以及抖动均较大;当工作系数高于 52.7% 时,抖动均方根降低至 10 ns 以内;工作系数达到 57.5% 以上时具有很好的触发特性,触发放电延时小于 40 ns,均方根小于 3 ns。

表 1 不同工作系数条件下开关触发放电延时及抖动实验结果

Table 1 Experimental results of switch trigger discharge delay and jitter under different working coefficients

working coefficient/%	experimental voltage/kV	delayed average/ns	delayed root mean square/ns
38.3	± 28	1275	131
43.2	± 31.5	1127	77.6
48.0	± 35	122	29.8
52.7	± 38.5	60	9.9
57.5	± 42	43	4.9
62.3	± 45.5	37	2.4
67.1	± 49	35	2.1

在充气气压 0.32 MPa 条件下、充电 ± 50 kV (工作系数为 68.5%)条件下,开展了大量触发放电实验以检验开关运行稳定性。近 2 000 次实验结果表明开关运行稳定,未出现一次自击穿现象,每发实验均能正常触发放电,延时抖动较小,延时抖动均方根 2.76 ns,实验结果如图 8(a)所示;上述触发实验放电延时值较符合正态分布,见图 8(b)所示;图 8(c)为典型的触发电压波形以及放电电流曲线。

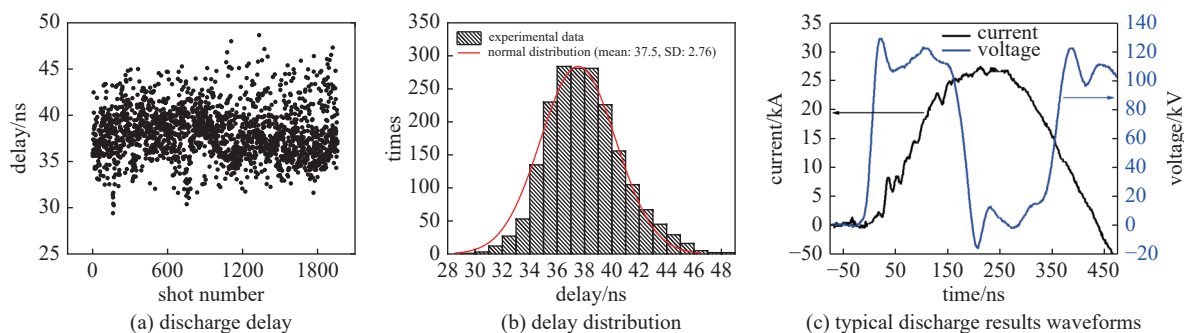
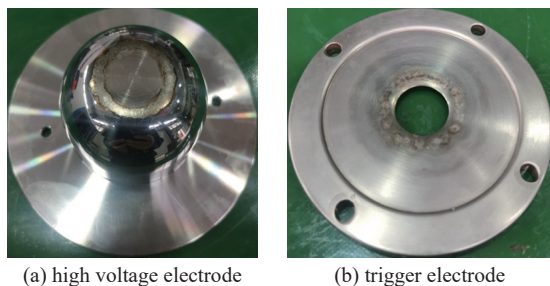


Fig. 8 Experimental results of trigger discharge

图 8 触发放电实验结果

3.3 开关电极放电通道

电极间电场分布模拟表明,充电时刻与触发时刻的电场强度分布最大值处于触发电极不同位置。电场强度最大处的气体首先开始电离,放电从此处开始,因此在这两种放电方式下具有不同的放电通道,图 9 为仅通过自击穿实验的开关电极,图 10 为经过触发放电实验的开关电极。放电痕迹表明:自击穿条件下,大量击穿点几乎都出现在图 2(a)中电场强度最大处,触发电极曲率最小处几乎没有放电点;触发放电实验条件下,放电点除少数外,都发生在曲率半径最小处,此外正负高压极上放电点位置也有所区别。该结果表明,在充电时刻触发放电通道不容易击穿;在给触发极施加高压触发脉冲时,触发极与和它极性相反的高压电极之间电压差升高的同时出现了一条更容易导通的放电通道,使得开关更容易导通,具有较好的触发效果。

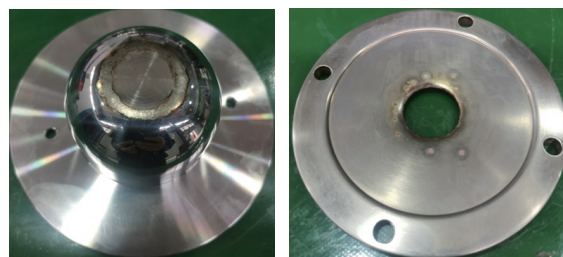


(a) high voltage electrode

(b) trigger electrode

Fig. 9 Switch electrodes after self-breakdown experiment

图 9 自击穿实验后开关电极



(a) high voltage electrode

(b) trigger electrode

Fig. 10 Switch electrodes after trigger discharge experiment

图 10 触发放电实验后开关电极

3.4 开关大电流实验考核

基于上述开关开展了大电流放电考核实验研究,采用 4 个 $1 \mu\text{F}/60 \text{ kV}$ 电容器和两只气体开关,搭建了 Marx 模块,如图 11(a)所示。开展了短路放电实验研究,电路参数 $C=250 \text{ nF}$, $R=155 \text{ m}\Omega$, $L=367 \text{ nH}$ 。在充电 $\pm 50 \text{ kV}$ 条件下短路放电电流峰值达到 150 kA,周期 $2 \mu\text{s}$,放电电流波形如图 11(b)所示。开展了充电 $\pm 50 \text{ kV}$ 、工作系数 68.5%条件下上千次触发放电实验,开关放电稳定,未出现自击穿以及无法触发现象;如图 11(c)所示,两个电极和触发极表面依旧光滑,从电极放电后的显微图 11(d)可以看出,电弧对电极表面的烧蚀非常均匀,表明开关可以在 150 kA、 μs 级放电脉冲下稳定运行。

要保证整机的稳定运行,需要开关具有极低的自放电概率,工作系数越低,自击概率越低,图 7(b)中自击穿电压分布与拟合曲线与实验数据在较低电压下具有一定偏差,基于温布尔分布的拟合数据难以准确预测低工作系数条件下的自击穿概率,本文中在开关性能参数测试平台上开展了 2000 次放电实验,Marx 大电流考核平台上进行了 1000 余次实验(两只开关共计 2000 余次),开关在工作系数 68.5%条件下的共计 4000 余发次放电实验中未出现一次自击穿现象,表明开关自击穿概率低于 2.5×10^{-4} ,工作系数 60%条件下应具有更低的自击穿概率,能实现 3 至 4 百只开关同时运行的可靠性,达到设计要求。后续还需加工更多的开关,进一步开展触发放电实验,测试开关运

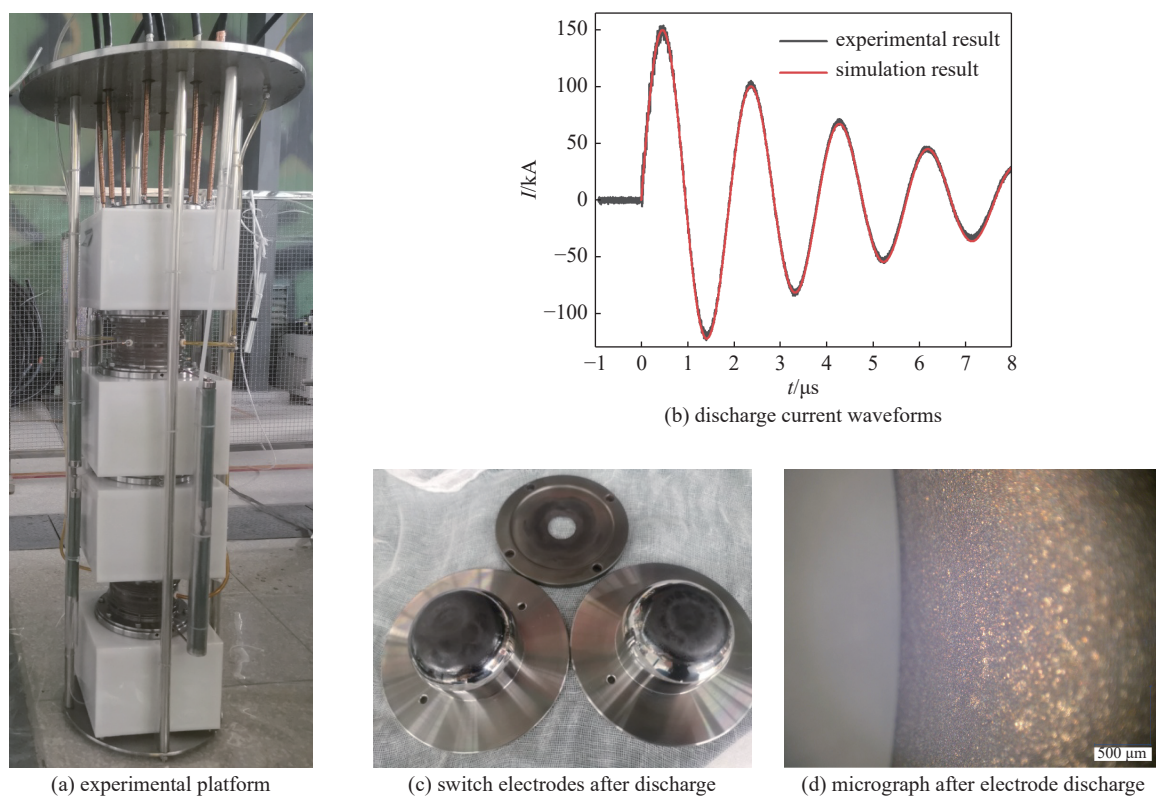


Fig. 11 Experimental platform and results of switching high-current assessment

图 11 开关大电流考核实验平台及实验结果

行稳定性并验证批量加工开关能否保证性能一致。

4 结论

基于用于磁驱动实验的 10 MA 级脉冲大电流装置中 300~400 只开关同时可靠运行的需求,开展了一种具有较高场畸变系数的大电流三电极气体开关设计及实验研究。通过模拟计算,选用椭圆状刀口端面孔的触发电极,设计了一种用于双极性充电的场畸变三电极气体开关。触发前后,电势差突变的同时,电场强度最大处位置变化,使得开关具有较高的场畸变系数,在触发电压与充电电压相当条件下,开关场畸变系数接近 4。开展了大量的开关自击穿实验以及触发放电实验研究,开关具有稳定的自击穿性能,1.2 k Ω 触发隔离电阻条件下实验结果显示,工作系数 60% 以上时,开关抖动均方根小于 3 ns,工作系数 68.5% 时放电稳定,开关共计 4000 余次实验未出现自放电现象以及无法触发现象,且能在 150 kA 以内、 μ s 级脉冲电流条件下稳定工作,表明开关具有较好的工作性能,满足设计要求。

参考文献:

- [1] 韩旻, 邹晓兵, 张贵新. 脉冲功率技术基础[M]. 北京: 清华大学出版社, 2010. (Han Min, Zou Xiaobing, Zhang Guixin. Technology of pulsed power[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2010)
- [2] 王莹. 脉冲功率科学与技术[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2010. (Wang Ying. Science and technology on pulsed power[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2010)
- [3] 王桂吉, 罗斌强, 陈学秒, 等. 磁驱动平面准等熵加载装置、实验技术及应用研究新进展[J]. *爆炸与冲击*, 2021, 41: 121403. (Wang Guiji, Luo Binqiang, Chen Xuemiao, et al. Recent progress on the experimental facilities, techniques and applications of magnetically driven quasi-isentropic compression[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2021, 41: 121403)
- [4] Sinars D B, Sweeney M A, Alexander C S, et al. Review of pulsed power-driven high energy density physics research on Z at Sandia[J]. *Physics of Plasmas*, 2020, 27: 070501.
- [5] Reisman D B, Stoltzfus B S, Stygar W A, et al. Pulsed power accelerator for material physics experiments[J]. *Physical Review Accelerators and Beams*, 2015, 18: 090401.
- [6] Waisman E M, Reisman D B, Stoltzfus B S, et al. Optimization of current waveform tailoring for magnetically driven isentropic compression experiments[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2016, 87: 063906.
- [7] Porwitzky A, Cochrane K R, Stoltzfus B. Determining the electrical conductivity of metals using the 2 MA Thor pulsed power driver[J]. *Review of Scientific*

- Instruments*, 2021, 92: 053551.
- [8] Stygar W A, Reisman D B, Stoltzfus B S, et al. Conceptual design of a 10^{13} -W pulsed-power accelerator for megajoule-class dynamic-material-physics experiments[J]. *Physical Review Accelerators and Beams*, 2016, 19: 070401.
- [9] Kim A, Frolov S, Alexeenko V, et al. Prefire probability of the switch type Fast LTD[C]//Proceedings of 2009 IEEE Pulsed Power Conference. 2009: 565-570.
- [10] Woodworth J, Alexander J, Gruner F R, et al. Low-inductance gas switches for linear transformer drivers[J]. *Physical Review Special Topics - Accelerators and Beams*, 2009, 12: 060401.
- [11] Woodworth J R, Stygar W A, Bennett L F, et al. New low inductance gas switches for linear transformer drivers[J]. *Physical Review Special Topics - Accelerators and Beams*, 2010, 13: 080401.
- [12] 翟戎骁, 罗维熙, 邱孟通, 等. 工作系数对直流耐压气体开关间隙中初始电子发展特性的影响[J]. *高电压技术*, 2019, 45(3): 826-831. (Zhai Rongxiao, Luo Weixi, Qiu Mengtong, et al. Influence of working coefficient on the development characteristics of initial electrons in gas switch gap under DC-withstanding process[J]. *High Voltage Engineering*, 2019, 45(3): 826-831)
- [13] 孙铁平, 丛培天, 李阳, 等. 多间隙气体开关触发特性[J]. *强激光与粒子束*, 2012, 24(9): 2239-2244. (Sun Tieping, Cong Peitian, Li Yang, et al. Experimental study on triggering breakdown characteristics of multi-gap gas switch[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2012, 24(9): 2239-2244)
- [14] 张昱钊, 李晓昂, 裴哲浩, 等. FLTD气体火花开关自放电特性[J]. *太赫兹科学与电子信息学报*, 2019, 17(5): 919-923. (Zhang Yuzhao, Li Xiaoang, Pei Zhehao, et al. Investigation on pre-fire characteristics of FLTD gas spark switches[J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology*, 2019, 17(5): 919-923)
- [15] 刘鹏, 魏浩, 孙凤举, 等. 快放电直线变压器型驱动源用场畸变型低电感气体火花开关[J]. *高电压技术*, 2011, 37(10): 2554-2560. (Liu Peng, Wei Hao, Sun Fengju, et al. Low inductance field-distortion gas spark switches for fast linear transformer drivers[J]. *High Voltage Engineering*, 2011, 37(10): 2554-2560)
- [16] 李颖, 靳建伟, 陈立, 等. FLTD三电极场畸变气体开关寿命特性[J]. *强激光与粒子束*, 2020, 32: 035002. (Li Ying, Jin Jianwei, Chen Li, et al. Lifetime characteristic of three-electrode field-distortion gas switch of fast linear transformer driver[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2020, 32: 035002)
- [17] 降宏瑜, 姜晓峰, 孙凤举, 等. FLTD低电感三电极场畸变气体开关击穿特性[C]//中国核科学技术进展报告(第六卷)——中国核学会2019年学术年会论文集第7册(计算物理分卷、核物理分卷、粒子加速器分卷、核聚变与等离子体物理分卷、脉冲功率技术及其应用分卷、辐射物理分卷、核工程力学分卷、核测试与分析分卷). 2019. (Jiang Hongyu, Jiang Xiaofeng, Sun Fengju, et al. Study on discharge characteristics of a low inductance three-electrode field-distortion gas switch used for FLTD[C]//2019 Academic Annual Meeting of Chinese Nuclear Society. 2019)
- [18] 张恺焯, 宋法伦, 张北镇, 等. 小型场畸变气体开关的击穿抖动特性[J]. *强激光与粒子束*, 2018, 30: 105003. (Zhang Kaiye, Song Falun, Zhang Beizhen, et al. Breakdown jitter characteristics of small field distortion gas switch[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2018, 30: 105003)
- [19] 刘轩东. 气体开关击穿特性及其对FLTD输出影响的研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2010. (Liu Xuandong. Breakdown characteristics of gas switch and its influence on the output parameters of fast linear transformer driver[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2010)
- [20] Lee L, Qi Xiangdong, Cai Li, et al. Study on pre-fire phenomenon for multiplex high-energy spark gap switches with graphite electrodes[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2012, 19(3): 886-892.
- [21] Almalki S J, Nadarajah S. Modifications of the Weibull distribution: a review[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2014, 124: 32-55.