

文章编号: 1003-1480(2023)01-0001-05

# PCB平面三电极空气火花隙开关导通特性试验研究

曹兴, 韩克华, 杨康, 郭凯, 吴琴钟, 马红

(陕西应用物理化学研究所, 陕西西安, 710061)

**摘要:** 针对平面三电极空气火花隙开关的稳定性、响应时间等动态性能问题, 设计了阴极与阳极间隙为 1.6, 1.8, 2.0, 2.2, 2.4 mm 的 5 种 PCB 平面三电极空气火花隙开关, 分别对开关的最小击穿电压、导通性能的变化规律和放电寿命进行了试验研究。试验结果表明: PCB 平面三电极空气火花隙开关的最小击穿电压随着导通次数、阴极与阳极间隙的增加而增大; 在高压电容器充电电压、触发端的脉冲电压一致的条件下, 相同参数开关的响应时间随着导通次数的增加而增大; 在其他条件不变的情况下, 开关阴极与阳极间隙越大, 开关的放电寿命越长。

**关键词:** PCB 平面三电极; 空气火花隙开关; 最小击穿电压; 响应时间; 放电寿命

**中图分类号:** TJ450.2 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1003-1480.2023.01.001

## Experimental Study on Conduction Characteristics of PCB Planar Three Electrode Air Spark Gap Switch

CAO Xing, HAN Ke-hua, YANG Kang, GUO Kai, WU Qin-zhong, MA Hong

(Shaanxi Applied Physics and Chemistry Research Institute, Xi'an, 710061)

**Abstract:** Aiming at the stability, response time and other dynamic performance problems of planar three electrode air spark gap switch, five PCB planar three electrode air spark gap switches with gaps between cathode and anode of 1.6mm, 1.8mm, 2.0mm, 2.2mm and 2.4mm were designed in this paper. The minimum breakdown voltage, conductivity response and discharge life of the switches were tested and studied respectively. The test results show that the minimum breakdown voltage of PCB planar three electrode air spark gap switch increases with the increase of conduction times and gap between cathode and anode of switch; When the charging voltage of the high voltage capacitor and the pulse voltage at the trigger end remain the same, the response time of the switch with the same parameters increases with the increase of the conduction times; When other conditions remain unchanged, the larger the gap between cathode and anode of the switch, the longer the discharge life of the switch.

**Key words:** PCB planar three electrode; Air spark gap switch; Minimum breakdown voltage; Response time; Discharge life

高压开关作为爆炸箔起爆系统的重要组成器件, 对起爆系统能否形成可靠的窄脉冲大电流起关键作用。爆炸箔起爆系统用高压开关主要包括触发真空开关和触发火花隙开关<sup>[1-2]</sup>、半导体开关<sup>[3-4]</sup>、平面介质开关<sup>[5-8]</sup>。由于平面介质开关体积小、成本低、制作方便, 便于与爆炸箔进行集成, 逐步成为国内外研究者关注的对象, 其中, 平面火花隙开关因其可重复性而

得到广泛研究。1993年, Waschl JA<sup>[1]</sup>首次提到使用磁控溅射桥箔制作的平面三电极火花隙开关, 并将该平面三电极火花隙开关用于导通放电性能研究。2006年, 王桂吉<sup>[5]</sup>等制作出一种适用于平行板传输连接的平面火花隙三电极高压开关, 阴极和阳极为半圆形的不锈钢, 触发电极为窄细条的钨铜合金, 该开关应用于充电电压小于 10kV 的脉冲功率装置时, 与立体火

收稿日期: 2022-06-23

作者简介: 曹兴 (1996-), 男, 在读硕士研究生, 从事爆炸箔火工品技术研究。

通讯作者: 韩克华 (1981-), 男, 研究员, 从事爆炸箔火工品技术研究。

基金项目: 国家“十四五”基础科研项目 (No.90903050301)。

火花隙三电极开关相比, 放电回路电感降低约 50nH, 周期缩短近 1/3, 峰值电流增加约 1/3。2012 年, 周镇威等<sup>[6]</sup>采用表面微加工技术设计并制作了开关, 得出开关的峰值电流为 3.45kA, 上升时间为 164ns; 通过电路仿真并提取参数, 得出开关的电感为 26.5nH, 电阻为 66m $\Omega$ 。然而上述开关均没有对开关电极及火花隙进行封装, 容易受到灰尘、水滴等外界条件的污染而影响导通性能。2021 年, 杨智等<sup>[7-8]</sup>采用 PCB 对平面三电极空气火花隙开关进行了封装, 并研究了该开关不同参数下的最小击穿电压、放电峰值电流等性能。但对该开关最小击穿电压在多次导通条件下的稳定性、导通性能及响应时间等动态性能的变化规律、放电寿命变化规律及失效原因等并未进行研究。

针对上述问题, 本文设计了不同参数的 PCB 平面三电极空气火花隙开关, 并对开关的最小击穿电压、响应时间与导通次数之间的关系、开关的导通稳定性及失效原因进行研究, 为爆炸箔起爆系统小型化、低成本化研究提供技术途径。

## 1 开关的设计及制备

### 1.1 设计

PCB 平面三电极空气火花隙开关由 3 块芯板、电极材料和半固化片组成, 立体结构如图 1 所示。

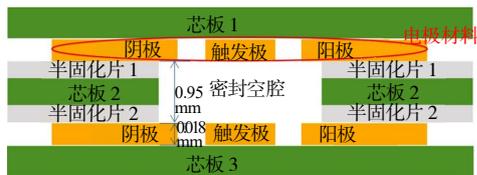


图 1 PCB 平面三电极空气火花隙开关内部结构图  
Fig. 1 Internal structure diagram of PCB plane three electrode air spark gap switch

开关构件从上到下依次为芯板 1、电极材料、半固化片 1、芯板 2、半固化片 2、电极材料、芯板 3。芯板 2 与半固化片粘接, 中间通过槽孔形成密封空腔, 密封空腔体积固定为 5mm  $\times$  6mm  $\times$  1mm。开关的 3 个电极位置及其之间的空气间隙结构如图 2 所示。开关的 3 个电极分别为阴极、触发极、阳极, 中间紫色线框包括的部分为密封空腔的范围, 为矩形区域, 长为 5mm, 宽为 6mm。为有效减少尖端效应的影响, 阳极与阴极的电极头部设计为半圆形; 而为有效利用

尖端效应, 触发极头部设计为矩形。

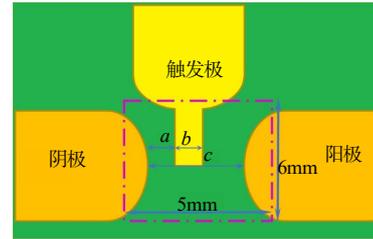


图 2 开关三个电极位置及之间的空气间隙结构  
Fig. 2 Three electrode positions of the switch and the air gap structure between them

根据气体击穿理论, 空气击穿场强为 3kV/mm, 考虑到触发极在阳极-阴极中间可能会使最小击穿电压降低, 设计开关阳极头部和阴极头部之间的距离  $c$  为 1.6, 1.8, 2.0, 2.2, 2.4mm; 触发极头部与阴极头部之间的间隙  $a$  固定为 0.5mm; 触发极头部宽度  $b$  固定为 0.6mm, 则触发极头部与阳极头部之间的间隙分别为 0.5, 0.7, 0.9, 1.1, 1.3 mm。理论计算可得开关的最小击穿电压分别为 1.5, 2.1, 2.7, 3.3, 3.9 kV, 包含了爆炸箔起爆系统用三电极空气火花隙开关的应用范围 (1.5~3.0 kV)。

### 1.2 制备

采用多层 PCB 制备工艺制备 PCB 平面三电极空气火花隙开关, 其中芯板是一种硬质、有特定厚度、两面包铜的板材, 是构成印制板的基础材料; 电极材料为铜箔, 是沉淀于电路板基层上的一层薄的、连续的铜, 是 PCB 的导体; 半固化片是指经过处理的玻纤布, 浸渍上树脂胶液, 再经热处理 (预烘) 而制成的薄片材料。制备所得 PCB 平面三电极空气火花隙开关实物如图 3 (a) 所示。为保障该开关的内部工艺质量, 使用 X 光射线对该开关进行检测, 检测结果如图 3 (b) 所示。

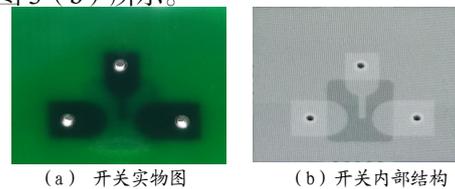


图 3 PCB 平面三电极空气火花隙开关实物和内部结构  
Fig. 3 Physical object and internal structure of PCB plane three electrode air spark gap switch

由图 3 (b) 可以清晰地分辨出触发极、阴极、阳极及密封空腔的位置, 开关的电极结构完整, 3 个电极的电极区域纯净, 且电极间隙之间没有多余的杂质, 不会影响开关的导通放电过程, 可用于试验测试。

## 2 试验部分

### 2.1 试验装置

PCB 平面三电极空气火花隙开关导通特性的测试电路原理如图 4 所示。试验设备主要包括 TRC2020 P6-12 型高压电源、HV6KV-4kV 型触发电源、C471/0.22  $\mu$ F/3.0kV 型高压电容器、PCB 平面三电极空气火花隙开关以及桥区厚度为 5.0  $\mu$ m, 尺寸 0.5mm  $\times$  0.5mm 的爆炸桥箔或长 20cm 的圆形导线, 其电阻为  $(45 \pm 5)\text{m}\Omega$ , 1MHz 测量频率下的电感为  $(30 \pm 5)\text{nH}$ 。测试设备包括采样速率不低于 1GS/s 的数字存储示波器(DSO)、1 000X/0.3pF/100M $\Omega$ 型高压探头、5008C 型 Rogowski 电流测量线圈。

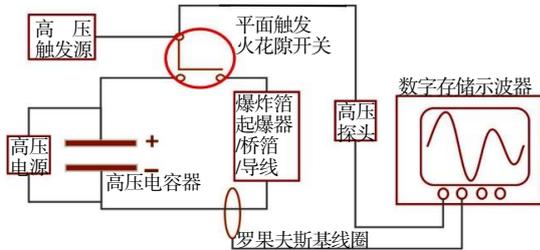


图 4 测试电路原理图

Fig. 4 Schematic diagram of test circuit

图 4 中高压电源给高压电容器充电升压, 用高压数字表检测充电电压; 当触发电源提供的脉冲电压信号经过 PCB 平面三电极空气火花隙开关的触发极, 使开关导通时, 高压电容器上的高电压经过 PCB 平面三电极空气火花隙开关和爆炸桥箔, 形成回路电流。使用 Rogowski 线圈测量回路电流, 使用高压探头采集触发端的脉冲电压信号, 并通过数字存储示波器记录回路电流及触发端的脉冲电压信号。

### 2.2 试验结果及分析

#### 2.2.1 最小击穿电压

最小击穿电压可以表征 PCB 平面三电极空气火花隙开关的安全特性。为研究开关最小击穿电压随导通次数的变化规律, 采用高压电源以约 60 V/s 的速率缓慢给高压电容器充电升压, 直至开关发生自击穿, 记录此时的电压, 即最小击穿电压  $V_{bk}$ , 手动切断电源。等待高压电容器放电至电压趋于零, 接通电源, 重新开始以相同速率给高压电容器充电升压, 进行下一次自击穿试验。当  $c$  从 1.6mm 增大到 2.4mm 时, 5

种间隙开关的最小击穿电压与充电次数的曲线见图 5。

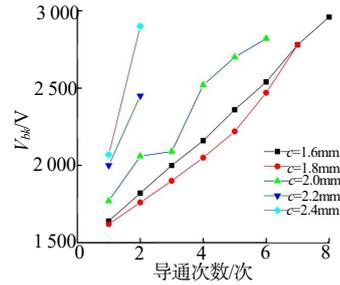


图 5 导通次数和最小击穿电压

Fig. 5 Conduction times and minimum breakdown voltage

从图 5 可知, 当  $c$  为 1.6mm 和 1.8mm 时, PCB 平面三电极空气火花隙开关对应的第 1 次最小击穿电压最低为 1 580 V;  $c$  为 2.4mm 时, 第 1 次最小击穿电压最低为 2 080 V。最小击穿电压  $V_{bk}$  随着开关的导通次数的增加而增大, 并且超过 3 000V。因为高压电容器的额定电压为 3 000 V, 为避免高压电容器因耐压不足而影响试验结果, 不再进行超过 3 000V 的试验。

为进一步确定 PCB 平面三电极空气火花隙开关在多次导通的情况下  $V_{bk}$  与  $c$  之间的关系, 在高压电容器充电电压为 1 500V 条件下, 采用多物理场仿真软件 COMSOL Multiphysics 对 PCB 平面三电极空气火花隙开关的静态电场进行了仿真分析, 获得  $c$  分别为 1.6, 1.8, 2.0, 2.2, 2.4 mm 的开关内部电场强度分布, 如图 6 所示。

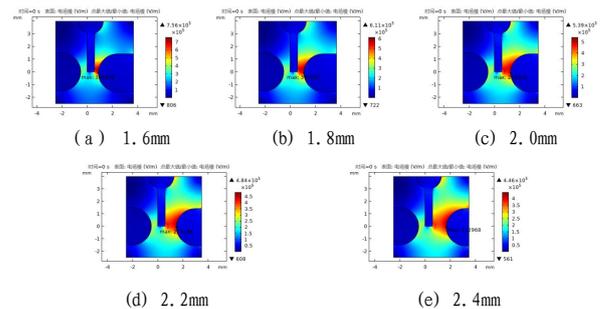


图 6 不同阳极与阴极间隙开关的内部场强分布

Fig. 6 Field strength distribution within the switch with different gap between cathode and anode

由图 6 可知, 随着  $c$  增加, 开关的内部电场强度最大值逐渐减小, 分别为  $7.56 \times 10^5$ ,  $6.11 \times 10^5$ ,  $5.39 \times 10^5$ ,  $4.84 \times 10^5$ ,  $4.46 \times 10^5$  V/m。根据气体击穿理论, 空气击穿时的电场强度为  $3 \times 10^6$  V/m, 因此, 当开关阴极与阳极之间的间隙增加时, 为使开关的阴极和阳极击穿导通, 需要提供较大的高压电容器充电电压, 即开关的最小击穿电压增大。

在试验过程中,随着开关导通次数的增加,可以从开关表面发现开关内部颜色逐渐变黑,开关的密封空腔出现污浊,并且 3 个电极之间的界限模糊。试验前后的开关表面状态如图 7 所示。

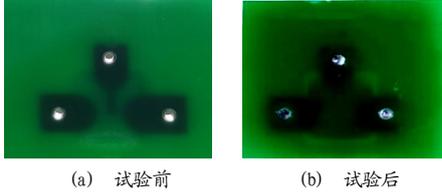


图 7 自击穿试验前后开关表面状态图

Fig.7 Surface state diagram of switch before and after self-breakdown test

为了探究开关出现污浊的原因,分别对自击穿试验前后相同参数的 2 个开关进行解剖,如图 8 所示。由图 8 可以看出,开关经过多次自击穿试验后,在阳极和阴极靠近火花隙的金属表面形成较亮的电极烧蚀痕迹,并且开关密封空腔内出现微小杂质。

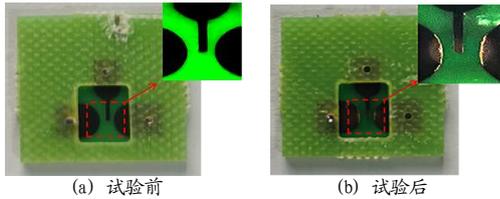


图 8 自击穿试验前后开关内部状态图

Fig.8 Internal state diagram of switch before and after self-breakdown test

分析认为,开关的最小击穿电压  $V_{bk}$  随着开关的导通次数的增加而增大,这是由开关的导通过程决定的。开关导通过程主要为空气中分子、原子、电子、离子之间的吸附、碰撞、激发、电离形成导电通道。在导通过程中,当电子、离子到达阳极、阴极时,通过撞击将能量传递给电极材料。电极材料遭受轰击而脱离电极,在电磁力的作用下从电极表面移出,在阳极和阴极靠近火花隙的金属表面形成较亮的电极烧蚀痕迹。从电极表面移出的电极材料飘散在密封空腔中,导致开关内部出现污浊。并且,电极材料的脱离使开关的阴极和阳极之间的间隙逐渐增大。根据巴申定律<sup>[9]</sup>,开关的最小击穿电压与空气压力和电极间隙的乘积相关。在介质为空气、电极为铜的条件下,巴申曲线的空气压力和电极间隙的乘积的最低点经验值为  $133\sim 66.66\text{Pa}\cdot\text{cm}$ 。本研究开关导通时密封空腔的气压为  $0.1\text{MPa}$ ,电极间间隙为  $1.6\sim 2.4\text{mm}$ ,空气压力和电极间隙的乘积为  $1.6\times 10^4\sim 2.4\times 10^4\text{Pa}\cdot\text{cm}$ ,处于

巴申曲线中击穿电压最低点的右侧,击穿电压随着空气压力和电极间隙的乘积的增大而增大,因此在开关内部密封空腔的空气压力保持不变的条件下,开关的最小击穿电压随着电极之间间隙增加而增大。

### 2.2.2 导通性能

高压开关的导通性能主要以响应时间  $t_{on}$  来表征,是爆炸箔起爆系统回路能否形成窄脉冲大电流以及能否正常起爆的关键指标。如图 9 所示,开关响应时间  $t_{on}$  是指触发端电压脉冲信号上升时刻至放电回路电流产生大电流上升时刻的时间间隔;回路电流峰值  $I_{max}$  是指测试电路回路电流波形的最大峰峰值;放电周期  $T$  表示测试电路回路电流波形的两个相邻同向波峰之间的间隔。试验测得开关导通次数与响应时间的试验数据,如图 10 所示。

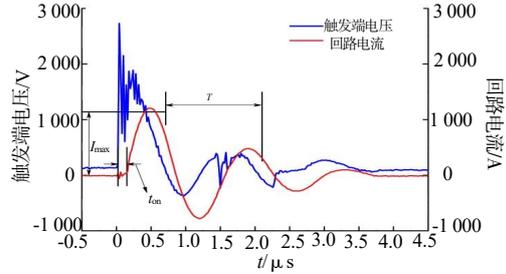


图 9 测试电路导通性能参数

Fig.9 Conduction performance parameters of the test circuit

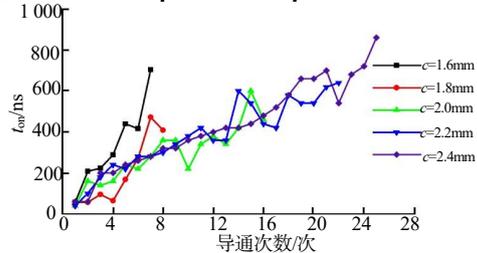


图 10 导通次数与响应时间

Fig.10 Conduction times and response time

由图 10 可得,开关的响应时间随着导通次数的增加而增大。表 1 所列为开关参数  $c$  为  $2.4\text{mm}$  时,在高压电容器充电电压为  $1500\text{V}$ 、触发端的脉冲电压为  $2000\text{V}$  的条件下,回路导通过程对应的试验数据。由表 1 可见经过 10 次的导通试验,开关的响应时间由  $60\text{ns}$  增加到  $360\text{ns}$ ,再经过 10 次,开关的响应时间由  $360\text{ns}$  增加到  $660\text{ns}$ 。开关的响应时间  $t_{on}$  随着开关的导通次数增加而逐渐增大,测试电路回路的  $I_{max}$ 、 $T$  保持不变。分析认为随着开关导通次数增加,开关的电极烧蚀使 3 个电极之间的间隙增加,在电极电位不变的条件下,电极间的电场强度降低。电场强度降低

使得电场对电子、离子的加速作用减弱,电子、离子、中性分子的每次碰撞产生的电子、离子数目变少,电极间形成电子崩的速度变慢,使得电流通过空气介质所需要的时间增加,即开关的响应时间增加。

表1 回路导通放电试验数据

导通次数	$t_{on}$ /ns	$I_{max}$ /A	$T$ / $\mu$ s	导通次数	$t_{on}$ /ns	$I_{max}$ /A	$T$ / $\mu$ s
1	60	1 200	1.40	11	380	1 200	1.40
2	60	1 200	1.40	12	400	1 200	1.42
3	200	1 200	1.40	13	420	1 200	1.40
4	200	1 200	1.40	14	420	1 200	1.42
5	240	1 200	1.42	15	440	1 200	1.40
6	260	1 200	1.40	16	480	1 200	1.40
7	280	1 200	1.40	17	520	1 200	1.40
8	320	1 200	1.36	18	580	1 200	1.40
9	320	1 200	1.40	19	660	1 200	1.40
10	360	1 200	1.40	20	660	1 200	1.40

### 2.2.3 放电寿命

开关的放电寿命是影响爆炸箔起爆系统可靠性的关键性指标,指开关从第1次导通开始到开关无法耐受指定电压,或在指定耐压条件下,开关无法导通时经历的放电导通次数。通过对5种阴极与阳极间隙的PCB平面三电极空气火花隙开关进行放电寿命试验,获得了开关放电寿命 $T_f$ ,如表2所示。

表2 不同阴极与阳极间隙开关的放电寿命

Tab.2 Discharge life of switch with different gaps between cathode and anode

$c/mm$	1.6	1.8	2.0	2.2	2.4
$T_f/次$	7	8	16	22	25

由表2可知,在保持工作电压、触发电压,以及开关参数 $a$ 和 $b$ 不变的条件下,开关的成功导通次数随着阴极与阳极间隙的增加而增大。

这是由于在其他条件相同的情况下,阴极与阳极之间间隙小的开关在阴极与阳极中间形成电场的平均电场强度较大,因而电极间粒子携带的能量大。开关导通过程中存在能量损耗,电极间隙小的开关形成导电通道需要通过的间隙小,故粒子运动过程中消耗的能量小,因而平均动能较大。当粒子撞击电极时,电极材料吸收的能量多,引起的电极烧蚀更严重,故阴极与阳极之间间隙较小的开关相较于间隙较大的开关导通次数较少,其放电寿命更短。

## 3 结论

本文针对PCB平面三电极空气火花隙开关的稳

定性、响应时间等动态性能问题,开展了导通特性试验研究,得到以下结论:(1)PCB平面三电极空气火花隙开关的最小击穿电压随着导通次数的增加而增大;当开关触发极与阴极之间的间隙、触发极宽度保持不变,随着阴极与阳极之间的间隙从1.6mm增大到2.4mm,开关的内部电场强度最大值逐渐减小,因而开关的最小击穿电压逐渐增大。(2)在高压电容器充电电压、触发端脉冲电压保持稳定的条件下,相同参数开关的响应时间随着导通次数的增加而增大。

(3)在相同的外界条件下,PCB平面三电极空气火花隙开关的触发极宽度、触发极与阴极间距不变时,开关阴极与阳极之间的间隙越大,开关的放电寿命越长。

### 参考文献:

- [1] Waschl J A, Hatt D J. Characterization of a small-scale exploding bridge foil flyer generator[J]. International Journal of Impact Engineering, 1993, 14(1-4): 785-796.
- [2] Chu K W, Scott G L. A Comparison of high-voltage switches[R]. Office of Scientific & Technical Information Technical Reports, 2017.
- [3] 李蛟,同红海,周密,等. EFIs用高压开关的性能测试与优选研究[J].军民两用技术与产品, 2018(12):190.
- [4] 张兴强,陈楠,陈万军.一种基于CS-MCT串联的脉冲放电电路设计与实现[J].电子与封装, 2020(7):33-38.
- [5] 王桂吉,吴刚,赵剑衡,等.平面火花隙三电极开关研制及性能测试[J].强激光与粒子束, 2006, 18(2):349-352.
- [6] 周镇威,杨卓青,丁桂甫,等.微型平面式气体火花开关的设计和制作[J].强激光与粒子束, 2012, 24(5):1 256-1 260.
- [7] 杨智,朱朋,初青芸,等.PCB基密封并联平面触发火花隙开关的设计及性能[J].含能材料, 2021, 29(6):543-551.
- [8] Yang Z, Wang K, Zhu P, et al.A reusable planar triggered spark-gap switch batched-fabricated with PCB technology for medium and low-voltage pulse power systems[J].Defence Technology, 2021, 17(4):1 572-1 578.
- [9] 蔡瑞娇.火工品设计原理[M].北京:北京理工大学出版社, 1999.